

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA
CURSO DE MESTRADO EM ECONOMIA

MOZART SANTOS MARTINS

**INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS DA INDÚSTRIA 4.0: APLICAÇÕES E
IMPLICAÇÕES PARA A SIDERURGIA BRASILEIRA**

UBERLÂNDIA, MG

2019

MOZART SANTOS MARTINS

**INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS DA INDÚSTRIA 4.0: APLICAÇÕES E
IMPLICAÇÕES PARA A SIDERURGIA BRASILEIRA**

Dissertação apresentada ao Instituto de Economia e Relações Internacionais da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Economia.

Área de Concentração: Desenvolvimento Econômico

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marisa dos Reis Azevedo Botelho

Coorientador: Prof. Dr. Germano Mendes de Paula

Uberlândia, 22 de Fevereiro de 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

M366i Martins, Mozart Santos, 1988-
2019 Inovações tecnológicas da indústria 4.0 [recurso eletrônico] :
 aplicações e implicações para a siderurgia brasileira / Mozart Santos
 Martins. - 2019.

 Orientadora: Marisa dos Reis Azevedo Botelho
 Coorientador: Germano Mendes de Paula
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Economia.
 Modo de acesso: Internet.
 Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.932>
 Inclui bibliografia.
 Inclui ilustrações.

 1. Economia. 2. Indústria - Inovações tecnológicas. 3. Indústria
Siderúrgica - Brasil. 4. Indústria siderúrgica - Aspectos econômicos. I.
Botelho, Marisa dos Reis Azevedo, 1961-, (Orient.). II. Paula, Germano
Mendes de, 1966, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Economia. III. Título.

CDU: 330

MOZART SANTOS MARTINS

**INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS DA INDÚSTRIA 4.0: APLICAÇÕES E
IMPLICAÇÕES PARA A SIDERURGIA BRASILEIRA**

Dissertação apresentada ao Instituto de Economia e Relações Internacionais da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Economia.

Área de Concentração: Desenvolvimento Econômico

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marisa dos Reis Azevedo Botelho

Coorientador: Prof. Dr. Germano Mendes de Paula

BANCA EXAMINADORA:

Uberlândia, 22 de Fevereiro de 2019.

Prof.^a Dr.^a Marisa dos Reis Azevedo Botelho
(Orientadora - IERI/UFU)

Prof.^a Dr.^a Ana Paula Macedo de Avellar
(Examinador - IERI/UFU)

Prof. Dr. Marcelo Silva Pinho
(Examinador - DEP/UFSCAR)

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pelas oportunidades concedidas e por ter me guiado durante todo esse tempo.

À minha mãe, Eunice, pela dedicação, apoio, carinho e cuidado mesmo que a distância. Por ter acreditado e confiado em mim. Por ter me ensinado tanto e colaborar com o meu crescimento pessoal. Por ser minha fonte de inspiração e, na qual sem sua ajuda eu não teria realizado esse projeto.

À minha namorada, Verônica, pela dedicação e compreensão durante os momentos em que estive ausente e que se mostrou, acima de tudo, uma grande amiga.

À minha orientadora, Professora Marisa Botelho, fonte de inspiração e admiração. Pela paciência, prontidão e envolvimento na elaboração deste trabalho.

Ao meu coorientador, Professor Germano, pelo incentivo, debates e conselhos na elaboração deste projeto. Sua ajuda e conhecimento foram fundamentais para meu desenvolvimento profissional.

Para elaboração desta Dissertação, além das referências bibliográficas citadas ao final do trabalho, foram realizadas entrevistas junto aos seguintes especialistas e empresas, a quem o autor agradece a valiosa contribuição: Cristiano de Lanna (Usiminas), Felipe Ramos (Ternium Brasil), José Luiz Lopes de Sousa (Gerdau), Flávio da Silva Almeida e José Martins de Oliveira (ArcelorMittal Tubarão), Marcelo Menezes (Vallourec) e Wilson de Souza Paulino (Companhia Siderúrgica do Pecém – CSP).

Aos demais professores do Instituto de Economia e Relações Internacionais, pelo constante incentivo e por terem contribuído tanto para minha formação. Aos colegas de sala do PPGE/UFU, em especial, Cristiano Pereira Pacheco, Luiz Gustavo Fernandes Sereno, Matheus Rissa Peroni, Matheus Teodoro Gaglianone, Welber de Oliveira Rabelo e Welber Tomás de Oliveira. À Professora Ana Paula Macedo de Avellar e ao Professor Marcelo Silva Pinho por terem aceitado participar da Banca de avaliação deste trabalho.

Por fim, e não menos importante, à Universidade Federal de Uberlândia e à sociedade brasileira, por acreditarem no poder transformador do conhecimento, como fonte inesgotável de esperança.

Muito Obrigado.

RESUMO

A Indústria 4.0 tornou-se o tema do momento e tem ganhado cada vez mais espaço nos debates políticos e empresariais. As suas tecnologias representam um leque de oportunidades e desafios para várias indústrias e, ao mesmo tempo, incertezas sobre seus impactos. A partir da abordagem neoschumpeteriana da tecnologia e da mudança econômica, que propõe a inovação como elemento central ao desenvolvimento da atividade econômica e transformação das estruturas produtivas, o objetivo deste trabalho é identificar as tecnologias relevantes da Indústria 4.0 e suas aplicações e implicações para a siderurgia brasileira. Considera-se a hipótese de que os *Clusters* Tecnológicos da Indústria 4.0, em geral, não alteram significativamente a estrutura produtiva e as barreiras à entrada da cadeia de produção do aço, mas contribuem de forma significativa para elevar a competitividade dessas empresas. Para tanto, são apresentadas detalhadamente as principais tecnologias da Indústria 4.0 e suas aplicações à siderurgia. A partir de questionários aplicados em um grupo específico de empresas do setor siderúrgico brasileiro, foram levantadas as principais aplicações e implicações para a siderurgia brasileira. Como resultados principais da pesquisa, encontrou-se que as tecnologias da Indústria 4.0 tendem mais a melhorar a eficiência operacional e produtividade da indústria siderúrgica do que revolucioná-la, permanecendo inalterada a escala mínima de produção das plantas produtivas ou de equipamentos específicos. Quanto às suas aplicações nas etapas produtivas, identificou-se que nas etapas de redução e refino do aço encontram-se as melhores oportunidades para aplicação das tecnologias da Indústria 4.0. Em termos de mudança da estrutura siderúrgica brasileira, observou-se que os *Clusters* Tecnológicos tendem a favorecer as empresas já estabelecidas, sem alterações substanciais nas barreiras à entrada. Ademais, o estudo mostra que o hiato tecnológico entre as siderúrgicas brasileiras pode ser ampliado, aumentando, assim, a heterogeneidade entre as empresas.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Siderurgia. Indústria Siderúrgica Brasileira.

ABSTRACT

Industry 4.0 has become the theme of the moment and has gained more and more space in political and business discussions. Their technologies represent a range of opportunities and challenges for various industries and at the same time, uncertainties about their impacts. The based on Neoschumpeterian approach to technology and economic change, which proposes innovation as a central element to the development of economic activity and transformation of productive structures, the objective of this work is to identify the relevant technologies of Industry 4.0 and its applications and implications for the Brazilian steel industry. It's considered the hypothesis that the technology clusters of Industry 4.0, in general, do not significantly change the productive structure and barriers to entry steel production chair, but contribute significantly to raising the competitiveness of these companies. To this end, it is presenting in detail the main technologies of Industry 4.0 and its applications to the steel industry. Based on questionnaires applied to a specific group of companies in the Brazilian steel industry, were raised the main applications and implications for the Brazilian steel industry. The main results of the survey show that the technologies of Industry 4.0 tend to improve the operational efficiency and productivity of the steel industry rather than to revolutionize it, while maintaining the minimum production scale of the production plants or specific equipment. Regarding its application in the productive stages, the results leads to that in steel reduction and refining stages are the best opportunities for application of the technologies of Industry 4.0. In terms of changes in the Brazilian steel structure, it was observed that the Technological Clusters tend to favor established companies, but without substantial changes in entry barriers. In addition, the study shows that the technological gap between Brazilian steelmakers can be widened, thus increasing the heterogeneity among companies.

Keywords: Industry 4.0. Steel Industry. Brazilian Steel Industry

LISTA DE QUADROS, GRÁFICOS, FIGURAS E TABELAS

Quadro 1 – Padrões setoriais de atividades inovadoras, segundo a taxonomia de Pavitt	22
Quadro 2 – Padrões setoriais de atividades inovadoras: a taxonomia de Castellacci	24
Tabela 1 – Comparativo da produção de aço bruto mundial e brasileira por tipo de aciaria, de 1985 a 2017 (%)	28
Tabela 2 – Participação do lingotamento contínuo na produção mundial de aço bruto, segundo regiões e países selecionados 1985-2017 (%)	29
Quadro 3 – Processos Alternativos de Redução	32
Quadro 4 – Segmentos e produtos siderúrgicos	42
Gráfico 1 – Importância da construção no consumo de produtos siderúrgicos, segundo países selecionados (%)	43
Gráfico 2 – Importância relativa dos laminados planos e longos na produção mundial de produtos siderúrgicos, de 1990 a 2017	44
Figura 1 – Principais Rotas Tecnológicas da Indústria Siderúrgica	46
Quadro 5 – Etapas do Processo Siderúrgico e Rotas Tecnológicas	46
Tabela 3 – Distribuição da produção por tipo de aciaria, segundo os maiores produtores mundiais de aço bruto, 2017	49
Gráfico 3 – Produção mundial de aço bruto (milhões de toneladas) e participação chinesa na indústria mundial (%), de 2000 a 2017	52
Gráfico 4 - Exportação mundial de produtos siderúrgicos (milhões de toneladas) e proporção frente ao volume produzido (%), de 2000 a 2017	54
Gráfico 5 – Participação brasileira na produção e demanda global de aço, de 2000 a 2017	55
Tabela 4 – Evolução do valor adicionado da indústria siderúrgica brasileira, de 2006 a 2014	56
Tabela 5 – Evolução do emprego na indústria siderúrgica, de 2007 a 2016	57
Gráfico 6 – Desempenho recente do número de empregos e utilização da capacidade instalada da indústria siderúrgica brasileira, de 2007 a 2016	58
Gráfico 7 – Participação dos tipos de produtos siderúrgicos nas exportações brasileiras, de 2000 a 2017	60
Figura 2 – Esquema de uma rede de comunicação e as tecnologias emergentes	66
Quadro 6 – Indústria 4.0 e a relação investimento <i>versus</i> benefícios	76
Quadro 7 – Principais desafios relacionados à Indústria 4.0	77

Quadro 8 – Parque Siderúrgico Brasileiro	81
Quadro 9 – Aplicação dos <i>Clusters</i> Tecnológicos por etapa do processo produtivo	84
Gráfico 8 – Ritmo de difusão dos <i>Clusters</i> Tecnológicos na siderurgia brasileira	88
Quadro 10 – Percepção das empresas consultadas quanto aos impactos da Indústria 4.0 nas barreiras à entrada	90
Quadro 11 – Percepção das empresas consultadas quanto à ampliação da heterogeneidade entre as empresas em função da Indústria 4.0	91
Quadro 12 – Principais parcerias tecnológicas segundo as siderúrgicas consultadas	94

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO I: INOVAÇÃO E PROGRESSO TÉCNICO	13
1.1. Paradigmas e trajetórias tecnológicas enquanto mudança técnica e estrutural.....	13
1.2. Sistema Setorial de Inovação, padrões setoriais e a indústria siderúrgica.....	19
1.3. A evolução da base tecnológica da indústria do aço	25
CAPÍTULO 2: PANORAMA DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA	40
2.1. Produtos, etapas produtivas e rotas tecnológicas.....	40
2.2. O cenário internacional.....	51
2.3. O cenário da siderurgia brasileira	54
CAPÍTULO 3: INDÚSTRIA 4.0 E A SIDERURGIA BRASILEIRA	61
3.1. Fábricas inteligentes e seus <i>Clusters</i> Tecnológicos.....	61
3.2. A difusão das tecnologias da Indústria 4.0 na siderurgia mundial	72
3.3. A difusão das tecnologias da Indústria 4.0 na siderurgia brasileira.....	80
3.3.1. Aplicações e ritmo de difusão	82
3.3.2. Estratégias tecnológicas e barreiras à entrada	88
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
ANEXO 1.....	104

INTRODUÇÃO

O avanço e a difusão do paradigma das tecnologias de informação e comunicação vêm exigindo das empresas o desenvolvimento de modelos de negócios cada vez mais intensivos e dependentes de informação e conhecimento. Este paradigma impõe às empresas e outras organizações a urgência de desenvolverem comportamentos e estratégias que as tornem capazes de criar, aprimorar e proteger seus recursos, essenciais para a manutenção e construção de vantagens competitivas.

Em meio a esse ambiente de transformações tecnológicas, a difusão das tecnologias de *Big Data*, Internet das Coisas, Manufatura Aditiva e Novos Materiais, representa uma série de esforços no desenvolvimento de sistemas e processos mais eficientes de produção, usualmente denominados “Indústria 4.0”. A Indústria 4.0 faz referência ao que seria uma quarta revolução industrial, baseada principalmente na digitalização e interconectividade dos sistemas e elos da cadeia de desenvolvimento e produção. Trata-se da possibilidade de um aumento substancial da eficiência operacional, bem como o desenvolvimento de modelos de negócios, serviços e produtos inteiramente novos.

Ademais, o caráter multidisciplinar dessas tecnologias exige o envolvimento de representantes da indústria, fornecedores, empresas de tecnologia, universidades, institutos de pesquisas, organizações e os diferentes níveis governamentais, representando, portanto, um adensamento dos sistemas de inovações. Dessa forma, a difusão destas tecnologias deve elevar o conteúdo tecnológico de setores considerados tradicionais e, em geral, menos intensivos em tecnologia, como é o caso do setor siderúrgico. Logo, a inovação contínua passa a ser preponderante também nesses setores, que deverão vivenciar mais fortemente a instabilidade, segundo a corrente schumpeteriana, inerente ao processo capitalista no qual se inserem.

O avanço das inovações e incorporação de novos processos e tecnologias pela siderurgia é uma realidade, bem como o aumento da interação entre fornecedores, produtores e usuários que compõem o sistema setorial de produção e inovação da cadeia de aço. É possível identificar alguns movimentos de reorganização de atividades no desenvolvimento e produção de metais. As principais atividades ocorrem por meio de aquisição de tecnologia externa à empresa, concentradas na aquisição de equipamentos, e que atualmente incorpora conteúdo crescente de serviços técnicos de desenvolvimento e engenharia de produtos e processos, e implementação, manutenção e operação de sistemas industriais. Essas oportunidades de inovação e construção de vantagens competitivas se concentram no desenvolvimento e incorporação de processos autônomos, com maior eficiência energética e menores emissões de gases do efeito estufa, bem

como no desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e de melhor desempenho quanto às necessidades dos clientes produtores de bens finais (PETERS *et al.*, 2016).

Em resposta à relevância dessa temática, o presente trabalho busca desenvolver uma análise sobre a difusão das tecnologias da Indústria 4.0 e suas aplicações e implicações para a siderurgia brasileira, utilizando para tanto os resultados dos questionários aplicados em um grupo de empresas do setor, que possuem expressiva participação na produção de aço bruto brasileira e elevada compreensão sobre as tendências mundiais e nacionais. Partiu-se da hipótese que os *Clusters* Tecnológicos da Indústria 4.0, em geral, não alteram significativamente a estrutura produtiva e as barreiras à entrada da cadeia de produção do aço, mas contribuem de forma significativa para elevar a competitividade dessas empresas.

Para cumprir esse objetivo, os capítulos foram estruturados de modo a identificar as especificidades do processo inovativo na siderurgia, bem como, analisar a situação brasileira frente às novas tecnologias da Indústria 4.0.

O primeiro capítulo apresenta uma breve discussão sobre o processo de inovação a partir da abordagem neoschumpeteriana. Também discute algumas particularidades da siderurgia e apresenta um debate sobre a evolução da sua base tecnológica, destacando as principais inovações radicais do setor e a importância crescente das inovações de processos e produtos na manutenção da competitividade siderúrgica.

O capítulo dois tem como finalidade apresentar os principais produtos siderúrgicos, o processo de produção do aço e as rotas tecnológicas existentes. Para isso, são descritos os segmentos dos produtos siderúrgicos, seus maiores consumidores e sua participação na produção mundial. No que diz respeito ao processo de fabricação do aço e suas rotas tecnológicas, são apresentadas as principais etapas do processo produtivo e sua exigência segundo cada tipo de usina. Além disso, é realizada uma análise do panorama atual da siderurgia mundial, assim como uma análise da siderurgia brasileira, apontando suas principais peculiaridades.

O capítulo três tem o objetivo de apresentar as aplicações e implicações da Indústria 4.0 para a siderurgia brasileira. A partir de extensa pesquisa bibliográfica buscou-se apresentar detalhadamente as principais tecnologias da Indústria 4.0 e os *Clusters* Tecnológicos. Também procurou-se investigar os principais desenvolvimentos tecnológicos para a siderurgia dentro desta temática, bem como a apresentação de casos concretos de aplicações e os resultados alcançados pelas siderúrgicas.

Para alcançar o objetivo de apresentar as aplicações e implicações da Indústria 4.0 para a siderurgia brasileira, o capítulo três é dividido em três seções, a última delas dedicada a apresentar as principais aplicações por etapa do processo produtivo, as etapas com melhores potenciais de aproveitamento dos *Clusters* Tecnológicos, além do ritmo de difusão atual e esperado das novas tecnologias. Além de aprofundar o debate sobre esta temática, os resultados encontrados, fruto de questionários e entrevistas realizadas com um grupo específico de empresas do setor, são comparados com outros trabalhos recentes, permitindo, assim, levantar divergências e/ou complementariedades. Por fim, são apresentadas as implicações para a siderurgia brasileira, no que diz respeito às barreiras à entrada e à heterogeneidade entre as empresas do setor, assim como as principais parcerias tecnológicas desenvolvidas.

Por fim, nas considerações finais são resumidos os resultados alcançados e as principais conclusões do trabalho.

CAPÍTULO I: INOVAÇÃO E PROGRESSO TÉCNICO

A tríade ciência-tecnologia-produção apresenta múltiplas e complexas interações, de modo que não é possível estabelecer uma relação causal entre essas esferas. A mudança tecnológica, resultante do processo inovativo, desenvolve-se sob condições de incerteza e racionalidade limitada dos agentes e ocorre em um ambiente onde as dimensões tecnológicas, econômicas, sociais e institucionais incorporam tal mudança.

Nesse contexto, o processo de inovação possui uma dinâmica própria e as noções de paradigmas e trajetórias tecnológicas ganham relevância por representarem marcos importantes para o entendimento do papel da mudança tecnológica na conformação das estruturas de mercado e no processo de mudança estrutural, bem como no papel ativo das firmas no direcionamento dessas mudanças. Processo no qual, para Schumpeter (1961), é o elemento fundamental que põe e mantém em funcionamento a economia capitalista.

Desse modo, o fascínio intelectual reside na compreensão do processo de formação das estruturas produtivas e suas mudanças estruturais e não em como são administradas pela máquina capitalista (SCHUMPETER, 1961). Assim, este capítulo tem como objetivo apresentar o referencial teórico no qual está embasado este trabalho, além de investigar as peculiaridades da siderurgia e a evolução da sua base tecnológica, destacando os graus de oportunidade para a inovação e a intensidade dos esforços tecnológicos tipicamente empreendidos pelas empresas deste setor, além de discutir sobre as fontes do processo inovativo e a questão da apropriabilidade dos resultados das inovações.

1.1. Paradigmas e trajetórias tecnológicas enquanto mudança técnica e estrutural

Para entender os determinantes, procedimentos e direções da mudança técnica no que diz respeito a uma transformação da estrutura produtiva, Dosi (1982) faz uma adaptação à noção de paradigma científico¹ de Thomas Kuhn (1962) para elaborar o conceito de paradigma tecnológico. Ao adotar a noção kuhniana do processo científico e adaptá-la ao processo de inovação tecnológica, os autores neoschumpeterianos passam a pensar a ciência e a tecnologia

¹ Um paradigma científico é em termos aproximados: “[...] uma “perspectiva” que expressa problemas relevantes, um “modelo” e um “padrão” de inquirição. O sucesso do paradigma [...] constitui, no início, uma grande promessa de sucesso que se pode descobrir em exemplos selecionados e ainda incompletos.” (Kuhn apud Dosi, 1982, p. 152, tradução nossa).

de forma imbricada, intrinsecamente inter-relacionadas e incorporadas. É nesse contexto que Dosi (1988) define paradigma tecnológico como um:

[...] padrão de solução de problemas tecnoeconômicos baseados em princípios altamente seletivos derivados das ciências naturais, juntamente com regras específicas para a aquisição de novos conhecimentos e, se possível, proteção contra sua rápida difusão entre os competidores (DOSI, 1988, p. 1127, tradução nossa).

Há uma irrefutável similaridade, em termos de procedimento e definições, entre ciência e tecnologia, uma vez que a existência de paradigmas científicos incorpora determinados paradigmas tecnológicos e vice versa. Assim como os programas de pesquisa científica incorporam problemas, investigações, tarefas e perspectivas, o mesmo faz os programas de pesquisa tecnológica. Conforme afirma Cário (1995), no campo científico cada paradigma coloca problemas e sugere como solucioná-los segundo um método definitivo, no campo tecnológico o procedimento é o mesmo.

Para Conceição (2000), um paradigma tecnológico pode ser compreendido tanto como um exemplar – um artefato a ser desenvolvido ou melhorado – como uma série heurística. O motor a combustão dos automóveis e o avião a jato são exemplos do primeiro caso, onde se constituem como uma espécie de guia tecnológico, que são progressivamente aperfeiçoados a partir de suas características tecno-econômicas. No que se refere aos procedimentos envolvidos na forma heurística, existem variações em grau e em especificidade quanto ao processo de busca, conforme o tipo de tecnologia adotada. Desse modo, cada paradigma tecnológico envolve uma específica “tecnologia de mudança tecnológica”, cujas capacidades requeridas pelo processo de busca envolvem também conhecimento não publicado e, portanto, tácito.

Na concepção de paradigma tecnológico, o desenvolvimento ou aperfeiçoamento de um artefato remete-se à distinção entre inovações radicais, aquelas que provocam surtos de desenvolvimento tecnológico e transformação da estrutura produtiva, e inovações incrementais, aquelas de menor expressão e impacto sobre esse sistema. Assim, tanto no campo científico como no tecnológico, uma inovação radical pode inaugurar um novo paradigma ou transformar o padrão científico/tecnológico vigente, resultando, assim, em novos métodos de pesquisas/produção. Em ambos os casos, as atividades de pesquisa e desenvolvimento por trajetórias estabelecidas – ciência normal ou progresso normal – são responsáveis por produzirem as chamadas inovações incrementais.

O período entre o surgimento e difusão de um novo paradigma tecnológico é marcado por grande incerteza e mudança das posições de liderança entre as firmas e países, visto que a

introdução de inovações radicais representa períodos de clara descontinuidade. À medida que avança e se aprofunda, o novo paradigma vai substituindo o anterior, produzindo mudanças de caráter econômico, no qual o sucesso de firmas e países na adoção de um novo paradigma está relacionado com a eliminação de competidores vinculados ao antigo paradigma. Portanto, um novo paradigma representa um novo leque de oportunidades para a expansão econômica e para o lucro e aumenta a busca por vantagens competitivas na nova estrutura que se instala (NICOLAU; PARANHOS, 2006).

Kupfer (1996) argumenta que a noção de paradigma tecnológico reconhece que, mesmo em suas formas variadas, é específico de cada tecnologia ou setor, ou seja, “é uma tecnologia de mudança técnica”, definida pela base de informações resultantes das suas formas de conhecimento – científico ou tácito – e das capacitações acumuladas pelos inovadores, através de experiências passadas que são idiossincráticas a cada tecnologia e a cada institucionalidade setorial.

Os paradigmas tecnológicos, portanto, variam conforme a sua difusão e efeitos sobre o sistema econômico: há paradigmas cujos limites estão circunscritos a setores de atividade, por exemplo o paradigma da biotecnologia; há outros paradigmas que têm penetração horizontal em muitos setores da economia, como é o caso do paradigma das tecnologias de informação e comunicação. Ademais, os paradigmas tecnológicos impactam a estrutura produtiva em dois aspectos distintos: (i) nos setores chaves do paradigma as inovações radicais são responsáveis pelo surgimento de novas indústrias; e (ii) nos setores adjacentes as inovações incrementais são responsáveis pela revitalização das indústrias maduras.

As especificidades dos problemas, inerentes a cada paradigma tecnológico, geram determinadas escolhas entre as possíveis alternativas de mudança técnica vislumbradas. Essas escolhas, ao estarem contidas em um determinado arcabouço técnico-produtivo, determinarão a trajetória tecnológica, que consiste, então, como afirma Dosi (1988, p. 1128), na “atividade do progresso tecnológico onde ocorrem *trade-offs* econômicos e tecnológicos definidos pelo paradigma”.

A noção de trajetória tecnológica, ao ser definida como a direção tomada pelo progresso técnico dadas as escolhas constantes do paradigma, sugere que as firmas apresentam um processo de desenvolvimento tecnológico que é dependente das escolhas passadas que fizeram, em outras palavras, as firmas estariam numa situação de “*path dependence*”. É importante destacar que a trajetória tecnológica aqui supracitada corresponde a um nível mais abrangente,

tendo como foco de análise as decisões da economia como um todo e não de uma firma específica.

O conceito de trajetória tecnológica implica a existência de uma heurística positiva e uma heurística negativa: a primeira corresponde à identificação dos problemas que surgem naturalmente ao se prosseguir em uma trajetória, a qual consiste em verificar qual é a trajetória provável e quais serão os problemas enfrentados; a segunda está relacionada com a exclusão de alternativas tecnológicas em que aspectos técnicos e científicos vão sendo explorados dentro de um determinado percurso, numa lógica provável, admitindo certos caminhos e excluindo outros (CÁRIO, 1995).

As trajetórias tecnológicas apresentam algumas características relevantes que, segundo Dosi (1982, p. 154), podem ser resumidas da seguinte forma: (i) podem ser mais gerais ou específicas, bem como mais ou menos poderosas; (ii) normalmente há certa complementariedade entre as trajetórias; (iii) aquela que alcança o maior nível em uma direção tecnológica pode ser tomada como “fronteira tecnológica”; (iv) o progresso em uma trajetória tecnológica é passível de reter algumas características cumulativas; (v) quando uma trajetória é muito poderosa, pode ser difícil mudar para uma trajetória alternativa; e (vi) é um tanto controverso comparar e avaliar *ex ante*, se é possível, a superioridade de uma trajetória em relação a outra.

Logo, um novo paradigma tecnológico habilita novas formas de produção e competição a partir da tecnologia, onde novas trajetórias tecnológicas serão estabelecidas e o progresso técnico desenvolvido. Dosi (1988) observa que os avanços tecnológicos apresentam algumas características econômicas, tais como: oportunidade, apropriabilidade e cumulatividade.

As oportunidades tecnológicas podem ser classificadas quanto a sua intensidade, variedade, penetrabilidade e, ainda, segundo suas fontes de inovação. Geralmente, quando um novo paradigma se inicia, abrem-se muitas oportunidades de inovação nos setores-chaves do paradigma; tais condições de oportunidade refletem, então, a probabilidade de sucesso dos esforços inovativos. Já as condições de apropriabilidade remetem à capacidade de proteger a inovação de imitação e replicação lucrativa – patentes, segredo industrial e inovação contínua são alguns exemplos. A cumulatividade relaciona-se à capacidade de inovar das firmas. Níveis elevados de cumulatividade tecnológica no interior da firma favorecerem a grande empresa na disputa competitiva de mercados, enquanto níveis baixos indicam que os conhecimentos relevantes encontram-se disseminados, favorecendo a entrada de competidores potenciais, contestando, assim, as posições das firmas estabelecidas (NICOLAU; PARANHOS, 2006).

Desse modo, as barreiras à entrada são afetadas de formas distintas. Elas podem ser reforçadas à medida que a nova tecnologia beneficia as empresas já estabelecidas, seja pela diferenciação de produto ou vantagens absolutas de custos, ou ainda, pelas economias de escalas ou alto requerimento de capital inicial. Elas podem se apresentar reduzidas no caso de entrantes oriundos de indústrias correlatas, uma vez que estes apresentam vários elementos que incentivam sua entrada em novos mercados, tais como: ativos produtivos utilizados para diversificação de produtos e, conseqüentemente, atuação em novas áreas, recursos humanos qualificados, tecnologia, acesso a fontes internas e externas de financiamento ou unidades integradas verticalmente na produção de alguns insumos.

Por outro lado, em alguns casos, as novas tecnologias atuam no sentido de reduzir as barreiras à entrada, favorecendo, assim, os entrantes em potencial. Segundo Dosi (2006), nestes casos, frequentemente as empresas novas são as empresas inovadoras e, portanto, portadoras das novas tecnologias. Assim, as empresas já existentes dificilmente estão aptas a responder efetivamente aos novos concorrentes, pois estas tecnologias exigem novas aptidões e as empresas estabelecidas não as possuem e, portanto, é necessário um lapso temporal para seu desenvolvimento.

A emergência de novos paradigmas tecnológicos e o progresso normal por trajetórias tecnológicas vigentes corresponde, segundo Dosi (2006), a diferentes estruturas de oferta. Entretanto, em ambas configura-se alguma forma de poder oligopolista. No primeiro caso, a estrutura oligopolista decorre das diferenças entre as firmas em suas capacidades de inovação/imitação, com as economias dinâmicas associadas a essa capacidade, e com a preferência dos mercados, geralmente induzidas pela entrada frequente de empresas inovadoras. No segundo, a estrutura oligopolista deriva-se de barreiras à entrada estáveis, através da cumulatividade do progresso tecnológico ou de economias estáticas de escala.

Em razão disso, pode-se concluir que grandes oportunidades tecnológicas, altos graus de apropriabilidade – dificuldade de imitação – e cumulatividade, mantendo-se constantes os demais fatores, são responsáveis pela geração de empresas de grande porte e altos níveis de concentração. A concentração e o poder de mercado influenciam os atuais incentivos à inovação, uma vez que afetam primordialmente a apropriabilidade privada e, por conseguinte, os padrões de concorrência.

Visto que as firmas não podem ser consideradas homogêneas, a sobrevivência desses agentes dependerá das suas aptidões dinâmicas². Para Nelson (1991), as aptidões dinâmicas

² Para uma discussão detalhada ver: Teece & Pisano (1994) e Teece (2013).

podem ser resumidas em três aspectos diferentes mas fortemente relacionados de qualquer empresa. Conceitualmente esses elementos podem ser definidos como: (i) estratégia: conjunto de compromissos assumidos por uma empresa para definir e racionalizar seus objetivos e os modos como pretende operacionalizá-lo; (ii) estrutura: forma de organização e de governança da empresa, regulamentando como as decisões serão tomadas e levadas adiante, dada a sua ampla estratégia; e (iii) aptidões organizacionais: conjunto de rotinas organizacionais essenciais – classificadas hierarquicamente - para realizar determinada tarefa.

Em um ambiente de mudança técnica, as firmas necessitam de um conjunto de aptidões para inovar e para tirar vantagem econômica da inovação. Nesse sentido, para que as empresas sejam bem sucedidas, apenas as aptidões de P&D não asseguram o sucesso do processo inovativo. É preciso uma sintonia fina entre os vários departamentos – compras, produção, *marketing*, jurídico, financeiro e outros -, objetivando incorporar as aptidões tanto de apoio como complementares às novas tecnologias provenientes da P&D. Ademais, é necessário que a estratégia seja razoavelmente coerente com a forma com a qual a empresa é organizada e governada, capacitando-a a gerar e implementar inovações organizacionais e de gestão necessárias para alcançar e manter a competitividade (NELSON, 1991).

Para construir e preservar suas vantagens competitivas, é essencial que as empresas inovem e mudem constantemente, tornando a capacidade de perceber e moldar oportunidades e ameaças um elemento fundamental para a sua sustentabilidade. Portanto, as empresas devem adotar estratégias coerentes que as capacitem a decidir que novas trajetórias seguir e quais devem ser evitadas. Além disso, é preciso uma estrutura, em termos de organização e governança, que seja capaz de conduzir e apoiar a construção e a manutenção das aptidões essenciais necessárias para levar adiante sua estratégia de forma eficaz.

Diante disso, a heterogeneidade das firmas representa diferentes estratégias, e estas, por sua vez, correspondem a diferentes estruturas e aptidões organizacionais, inclusive aptidões em inovar. Consequentemente, as firmas seguirão trajetórias diferentes umas das outras. Algumas serão bem sucedidas em relação ao que as concorrentes estiverem fazendo e aos rumos dos mercados envolvidos, enquanto outras não. Para Dosi (2006), essas assimetrias interempresariais, descritas pelas aptidões dinâmicas, representam o fator primordial na mudança das estruturas e das participações de mercados de empresas e países específicos.

As aptidões dinâmicas representam, portanto, diferenças tecnológicas e comportamentais. As firmas e suas interações são capazes de influenciar o ambiente de mercado através de suas ações, e a capacidade de cada firma de afetar o mercado depende da sua posição

face à fronteira tecnológica, do seu tamanho, da sua participação de mercado, dentre outros fatores. Já as diferenças tecnológicas são responsáveis pelos diferenciais na produtividade, nas margens e taxas de lucro entre as empresas.

Nelson (1991) argumenta que são as diferenças organizacionais, em especial as diferenças nas aptidões em inovar e obter lucros a partir das inovações, mais do que as diferenças de domínio de determinadas tecnologias, as fontes de diferenças duráveis – e dificilmente replicáveis – entre as empresas.

O avanço tecnológico, conjuntamente com as mudanças organizacionais, tem sido um dos elementos chaves no direcionamento do crescimento econômico. A simultânea evolução da tecnologia e das instituições são os elementos centrais que explicam o sucesso dos países desenvolvidos em manter modernos sistemas de investimento em inovação e o avanço tecnológico que eles geram, indo muito além das fronteiras internas das firmas.

Nesse sentido, o papel de cada agente econômico no processo de mudança técnica é analisado à luz do referencial teórico sobre sistemas setoriais de inovação, o que torna possível investigar os elementos que compõem cada sistema setorial, suas divergências e similaridades, além de inúmeros fatores que caracterizam cada estrutura industrial. A partir desta perspectiva têm-se como objetivo analisar os padrões setoriais de inovação, destacando, por exemplo, as trajetórias tecnológicas de cada setor, as fontes do progresso técnico, os principais tipos de inovações, além de outras informações relevantes acerca do processo inovativo.

1.2. Sistema Setorial de Inovação, padrões setoriais e a indústria siderúrgica

Como observado, a maior parte do conhecimento tecnológico se encontra não como informação que é genericamente aplicada e facilmente reproduzível, mas como específica às firmas e aplicações, cumulativa em seu desenvolvimento e variável entre os setores da economia. Logo, o processo inovativo depende de um conjunto de elementos indispensáveis para que se reproduza de forma orgânica. A articulação entre esses diferentes elementos que compõem cada setor industrial pode ser explicada de um ponto de vista sistêmico, conforme tratado por Malerba (2002; 2003; 2005).

Ao considerar que um sistema setorial de inovação e produção é um conjunto de atividades que são unificadas por alguns grupos de produtos vinculados para uma dada ou potencial demanda, compartilham algum conhecimento comum e que as firmas de um setor

apresentam algumas semelhanças e ao mesmo tempo são heterogêneas, Malerba (2002) define um sistema setorial como:

“[...] um conjunto de produtos novos e estabelecidos para usos específicos e um conjunto de agentes que realizam interações de mercado e não-mercado para a criação, produção e venda desses produtos. Um sistema setorial tem uma base de conhecimento, tecnologias, insumos e uma demanda existente, emergente ou potencial. Os agentes que compõem o sistema setorial são organizações e indivíduos (consumidores, empresários, cientistas). As organizações podem ser empresas (usuários, produtores e fornecedores) e organizações não-firmas (universidades, instituições financeiras, agências governamentais, sindicatos ou associações técnicas), incluindo subunidades de organizações maiores (departamentos de P&D e produção) e grupos de organizações (associações industriais)” (Malerba, 2002, p. 250).

Segundo Malerba (2005), a estrutura de um sistema setorial de inovação pode ser descrita a partir de três dimensões principais:

- i. Conhecimento e domínio tecnológico: um setor pode ser caracterizado por uma base de conhecimento, tecnologias e insumos específicos. De forma dinâmica, o foco no conhecimento e no domínio tecnológico coloca no centro da análise a questão das fronteiras setoriais, que geralmente não são fixas, mas mudam ao longo do tempo;
- ii. Atores e redes: um setor é composto por agentes heterogêneos que são indivíduos ou organizações (firmas e não-firmas);
- iii. Instituições: o conhecimento, as ações e as interações dos agentes são moldadas por instituições, tais como normas, rotinas, hábitos comuns, regras, leis, padrões e assim por diante.

Ao longo do tempo, um sistema setorial passa por processos de mudança e transformação através da coevolução de seus vários elementos. As três dimensões descritas são a base do conceito de Sistema Setorial de Inovação, como resultado da interação de múltiplos fatores complexos, beneficiando o processo inovativo, que dificilmente ocorre de forma espontânea. Portanto, em um sistema setorial, a atividade inovadora é o resultado de interações sistemáticas entre uma grande variedade de atores para a geração e troca de conhecimento, possibilitando a sua efetivação e comercialização (MALERBA, 2003).

De acordo com Malerba (2002), inicialmente os agentes são orientados por relações de troca, concorrência e hierarquia. Em seguida, essas relações são explicadas por modelos de cooperação formal e informal entre as firmas e os demais agentes – mercantis ou não mercantis

– resultando em formas híbridas de governança, cooperação para P&D ou redes de empresas, visando integrar complementariedades em conhecimento, capacitações e especialização. Dessa forma, os elementos distintivos das interações entre os agentes/organizações em um setor determinam as complementariedades dinâmicas e a estrutura setorial vigente.

Em resumo, pode-se afirmar que os tipos e as estruturas de relacionamento e redes diferem consideravelmente de um sistema setorial para outro, como consequência das características da base de conhecimento, dos processos de aprendizagem, das tecnologias básicas, das características da demanda, dos principais elos e das complementariedades dinâmicas. Entretanto, em todos os sistemas setoriais as instituições desempenham um papel importante ao afetar a taxa de mudança tecnológica, a organização da atividade inovadora e o desempenho das firmas (MALERBA, 2005).

Assim, o conceito de sistemas setoriais viabiliza: analisar as diferenças e similaridades na estrutura, organização e limites dos setores; compreender adequadamente as diferenças e similaridades no funcionamento, dinâmica e transformação dos setores; identificar os fatores que afetam a inovação, o desempenho comercial e a competitividade internacional das firmas e países nos diferentes setores da economia; e o desenvolvimento de políticas públicas adequadas à dinâmica de cada setor (MALERBA, 2003).

Para Malerba (2002), mudanças na base de conhecimento das atividades de inovação tendem a requerer novas competências e promover desestabilização da organização industrial, com emergência de novas firmas e alterações na liderança. Além disso, alterações de demanda, usuários e aplicações seriam outros importantes fatores indutores de transformações no sistema setorial³, podendo favorecer a entrada de novas empresas em detrimento de firmas já estabelecidas.

Além dos fatores expostos até aqui, uma diferença fundamental entre os setores diz respeito às fontes de inovação e aos mecanismos de apropriabilidade. A partir dessas diferenças, Pavitt (1984) propôs quatro tipos de padrões de acumulação tecnológica, a saber: (i) dominada pelo fornecedor; (ii) intensiva em escala; (iii) fornecedores especializados; e (iv) baseada em ciência.

O setor siderúrgico, objeto deste estudo, enquadra-se na categoria setorial intensiva em escala, e as firmas que o englobam são predominantemente de grande porte. A acumulação tecnológica é gerada no *design*, na construção e na operacionalização de complexos sistemas

³ O surgimento de novos clusters que abrangem vários setores, como internet-software-telecom, medicamentos biotecnológicos e novos materiais, são alguns dos exemplos mais relevantes de processos de transformação em sistemas setoriais no período recente (Malerba, 2006).

de produção e/ou produtos. Uma vez que seus clientes/usuários são especialmente sensíveis ao preço e ao desempenho do produto, as trajetórias tecnológicas das indústrias intensivas em escala são direcionadas, de um modo geral, para a redução de custo e a melhoria/aprimoramento do produto. Nesse sentido, a liderança tecnológica se traduz na capacidade de projetar, construir e operar estes processos complexos a fim de produzir um produto final com o melhor custo/benefício (Quadro 1).

Para isso, as tecnologias de processo e produto desenvolvem-se incrementalmente na base da experiência operacional prévia e no aprimoramento de componentes, maquinários e subsistemas. As principais fontes de tecnologia nas indústrias intensivas em escala são, portanto, o *design* e a engenharia de produção, a experiência operacional e os fornecedores de equipamentos e componentes. A transferência de tecnologia requer licenciamento e *know-how* da produção, além de treinamentos, em adição à aquisição de equipamentos e outros insumos (PAVITT, 1984).

Quadro 1 – Padrões setoriais de atividades inovadoras, segundo a taxonomia de Pavitt

Setores	Produção de aço, vidro, cimento e outros materiais produzidos em grande quantidade; bens de consumo duráveis; automóveis
Tamanho das empresas	Grandes empresas
Tipo de usuário	Sensível ao preço e ao desempenho do produto
Direção das trajetórias tecnológicas	Redução de custo e aprimoramento do produto
Principais fontes de inovação	Engenharia de produção, aprendizado nas operações de produção, fornecedores e projeto
Principais tipos de inovações	Tecnologia de processo e equipamentos relacionados
Principais canais de imitação e de transferência tecnológica	Aquisição de equipamentos, licenciamento de <i>know-how</i> , treinamentos relacionados, engenharia reversa
Principais mecanismos de apropriação	Segredo, <i>design</i> e <i>know-how</i> de processo, patentes, economias dinâmicas de aprendizado

Fonte: adaptado de Pavitt (1984). Elaboração própria.

Os fluxos tecnológicos entre o setor siderúrgico e os demais setores, segundo a taxonomia de Pavitt (1984), podem ser descritos da seguinte forma: (i) fornecedor de produtos e soluções tecnológicas – aços de diferentes especificações e propriedades físicas e mecânicas – para os setores dominados pelos fornecedores e intensivos em escala; (ii) receptor de tecnologias dos setores baseados em ciência, tais como os setores de microeletrônica e química;

(iii) fornecedor e receptor de tecnologias do setor de fornecedores especializados de equipamentos de produção, mediante interações – *learning by interacting* - com essas empresas.

Pavitt (1984) destaca que os encadeamentos tecnológicos entre esses setores vão além das transações relacionadas à compra e venda de bens que incorporam tecnologia. Estes podem incluir fluxos de informação e habilidades, bem como diversificação tecnológica para as principais áreas de produto dos fornecedores e clientes.

Para Castellacci (2008), a taxonomia de Pavitt (1984) forneceu uma descrição estilizada e poderosa do conjunto de setores industriais que sustentaram o crescimento das economias desenvolvidas durante o período fordista. No entanto, nas últimas décadas o setor de serviços experimentou um rápido crescimento, e atualmente responde por uma grande parcela do valor agregado, do emprego e do comércio na maioria dos países industrializados.

O surgimento e avanço do paradigma das tecnologias de informação e comunicação – TIC's – criaram um novo dinamismo aos setores intensivos em informação e conhecimento, de tal modo que o crescimento do setor de serviços, em especial os serviços tecnológicos, está intimamente relacionado à emergência e difusão dessas novas tecnologias. Outro aspecto relevante é o intenso processo de terceirização ocorrido nas últimas décadas, onde muitas atividades anteriormente realizadas dentro das firmas industriais são agora exercidas por empresas de serviços especializados.

De acordo com Castellacci (2008), esse processo está levando a uma interdependência crescente e a uma troca de conhecimento mais intensa entre atividades industriais e serviços. Enquanto as indústrias manufatureiras terceirizam parte das atividades tecnológicas e produtivas para prestadores de serviços especializados, sustentando assim seu crescimento através de um novo patamar de produtos e serviços intermediários, os avanços tecnológicos no setor de serviços servem para sustentar a dinâmica de todo o ramo manufatureiro.

Assim, a taxonomia proposta por Castellacci (2008) avança em relação à proposta por Pavitt (1984)⁴ ao combinar manufatura e serviços industriais em uma única estrutura, visando maior integração entre os estudos dos padrões setoriais de inovação na indústria e nos serviços, e aponta o papel fundamental desempenhado pelas ligações verticais e intercâmbios intersetoriais de conhecimento entre eles (Quadro 2).

⁴ A taxonomia inicial proposta por Pavitt foi revisitada anos depois com a introdução da categoria de setores *information intensive* (intensivos em informação), de modo que refletisse os impactos do avanço das tecnologias de informação e comunicação (TIC's) em setores como Finanças, Varejo, Turismo, etc. Para uma discussão detalhada ver Bell, M.; Pavitt, K. (1993).

Quadro 2 – Padrões setoriais de atividades inovadoras: a taxonomia de Castellacci

Categoria setorial	Subgrupo	Setores típicos	Mecanismo de apropriação	Fontes das inovações	Tipo de inovações	Tamanho das firmas
Provedores de conhecimento avançado	Serviços empresariais intensivos em conhecimento	Software; P&D; Engenharia; Consultoria	Know-how; imitação	P&D; treinamento; cooperação; universidades ; usuários	Serviços; Organizacional	Pequenas e médias
	Fornecedores especializados em máquinas	Máquinas e instrumentos	Patentes; Know-how de design	Usuários; aquisição de equipamentos e software	Produto	Pequenas e médias
Bens de produção em escala	Indústrias baseadas em ciência	Eletrônico	Patentes; design; imitação	Universidade s; usuários; P&D; cooperação	Serviços; Organizacional	Grandes
	Indústrias intensivas em escala	Veículos motorizados	Design; sigilo do processo	Fornecedores ; usuários; P&D; aquisição de máquinas	Mix de produtos; Processo	Grandes
Serviços de infraestrutura de suporte	Serviços de infraestrutura de rede	Telecomuni- cações; Finanças	Padrões; normas; design	Fornecedores ; usuários; P&D; aquisição de software; treinamento	Mix de processo; Serviços; Organizacional	Grandes
	Serviços de infraestrutura física	Transportes; Comércio atacadista	Padrões; normas; design	Fornecedores ; aquisição de máquinas e software	Processo	Grandes
Bens e serviços pessoais	Bens dominados pelo fornecedor	Têxteis e vestuário	Marcas registradas; know-how de design	Fornecedores ; usuários; aquisição de máquinas	Processo	Pequenas e médias
	Serviços dominados pelo fornecedor	Hotéis e restaurantes	Não-técnicos (marketing, propaganda, aparência estética)	Fornecedores ; aquisição de máquinas; treinamento	Processo	Pequenas e médias

Fonte: adaptado de Castellacci (2008). Elaboração própria.

Além das relações já descritas, a cadeia de produção do aço apresenta estreita interação com os setores de serviços empresariais intensivos em conhecimento, ao demandar soluções de engenharia, software, P&D, consultoria e demais serviços especializados, e de serviços de infraestrutura de suporte, como os da estrutura de telecomunicações, serviços financeiros, estrutura logística e comercial, dentre outros.

Portanto, as indústrias que integram a categoria bens de produção em escala – intensivas em escala e baseadas em ciência – assumem uma posição central na cadeia de conhecimento, pois recebem insumos tecnológicos dos provedores de conhecimento avançado, enquanto fornecem, por sua vez, produtos tecnológicos que são utilizados pelos serviços de infraestrutura e por produtores de bens finais.

Assim, ao produzirem produtos tecnológicos avançados em larga escala, promovendo a eficiência e a qualidade do processo de produção de bens finais e serviços de infraestrutura, e aumentando a demanda por soluções especializadas de provedores de conhecimento avançado, esses grupos setoriais desempenham um papel central na dinâmica do sistema econômico. De acordo com Castellacci (2008), “elas são, portanto, as indústrias transportadoras de um novo paradigma tecnológico” (Freeman e Louçã *apud* Castellacci, 2008, p. 986).

Quando um novo paradigma tecnológico emerge e difunde-se por toda a economia, os setores industriais diferem consideravelmente em termos das oportunidades, capacidades e restrições tecnológicas que enfrentam. Os regimes tecnológicos de alta oportunidade estão em melhor posição para explorar as vantagens das novas tecnologias de propósito geral e têm maior potencial de crescimento. Algumas dessas indústrias pertencem ao grupo setorial de bens de produção em massa. Suas ligações verticais e os intercâmbios intersetoriais, permitem que parte desse potencial de crescimento seja transmitido para alguns dos outros grupos setoriais, revitalizando, portanto, a dinâmica do sistema econômico.

1.3. A evolução da base tecnológica da indústria do aço

A base tecnológica da indústria siderúrgica, tal como conhecemos nos dias de hoje, remete aos desenvolvimentos tecnológicos da produção de ferro e aço ocorridos a partir de meados do século XVIII. Tais transformações proporcionaram a substituição de técnicas rudimentares empregadas na fabricação do ferro e do aço por métodos mais adaptados à produção em massa e a custos reduzidos. Durante a primeira etapa da Revolução Industrial, a hegemonia do uso do ferro em relação ao aço se deu, sobretudo, em função das técnicas ainda primitivas empregadas na sua fabricação. Dessa forma, sua produção era realizada em pequena escala e o preço era muito superior ao do ferro, o que inviabilizava a sua substituição à época.

Já na segunda fase da Revolução Industrial, a siderurgia desempenhou um papel crucial, emergindo como um dos principais alicerces do novo tecido industrial que se formava. A difusão do uso do aço provocou profundas mudanças nos meios de produção e na

infraestrutura⁵, inaugurando assim a era do aço. O aprofundamento da mecanização dos meios de produção, tornar-se-ia, portanto, o elemento propulsor para o desenvolvimento dos novos métodos de fabricação dos produtos siderúrgicos⁶. A substituição da força hidráulica e humana por força motriz – máquinas à vapor e, mais tarde, a eletricidade – tornou possível a ampliação da capacidade dos equipamentos, dando maior regularidade e continuidade à produção.

Nesse contexto, o primeiro marco de transformações tecnológicas compreendeu as três etapas principais do processo siderúrgico: 1) redução: produção do ferro-gusa; 2) refino: produção do aço; 3) laminação: conformação do produto final. A principal inovação no processo de redução foi a substituição do carvão vegetal por carvão mineral, dando origem a siderurgia a coque. A tecnologia de produção de gusa em altos-fornos a coque foi desenvolvida a partir das experiências pioneiras da Abraham Darby na Inglaterra no início do século XVIII e, posteriormente, décadas mais tarde, difundida na Europa (FERREIRA, 1989).

Embora o funcionamento de ambos os altos-fornos seja semelhantes, as propriedades do coque como agente redutor, em especial sua alta resistência mecânica, possibilitou um aumento substancial das dimensões e, portanto, da capacidade de produção deste equipamento. Além disso, a necessidade de vastas reservas florestais exigida pela produção a base de carvão vegetal foi um dos principais entraves para a difusão desse processo, favorecendo assim, os altos-fornos a base de coque, tornando-o o método predominante na indústria do aço.

Na etapa de refino destacam-se duas importantes alternativas para a produção do aço: os métodos de refino em fornos – processo Siemens-Martin e aciaria elétrica – e os métodos de produção em conversores – processos Bessemer e Thomas. Segundo Ferreira (1993), a supremacia do processo Siemens-Martin em relação ao método Bessemer/Thomas permaneceu até os anos 1950-1960, quando suas principais vantagens se traduziam na maior flexibilidade em relação aos insumos (maior emprego de sucata), no maior controle da qualidade do produto e na maior variedade de tipos de aços que se podia obter.

No que concerne à etapa de laminação, sua principal inovação tecnológica – o laminador manual – foi impulsionada pelo crescimento sustentado da demanda e pela expansão da capacidade produtiva dos equipamentos a montante da cadeia do aço. Inicialmente, sua operação era movida por máquinas a vapor ou um motor elétrico, além de contar com atividades

⁵ Segundo Ferreira (1989), o desenvolvimento da indústria siderúrgica estimulou setores estratégicos à época, tais como: construção pesada, máquinas e outros bens de equipamentos, estradas de ferro, construção naval e etc. Estímulos estes que retroalimentavam o desenvolvimento do setor, uma vez que esses setores eram os principais consumidores dos produtos siderúrgicos.

⁶ Segundo Landes (1969 *apud* Morandi 1997, p. 9), as inovações iniciais reduziram de 80 a 90% o custo de produção do aço bruto, entre 1860 e 1890.

manuais como, por exemplo, a regulação dos cilindros de laminação. Gradativamente essas atividades foram mecanizadas, dando origem ao laminador automático (FERREIRA, 1993).

O conjunto de inovações tecnológicas – aço, eletricidade, petróleo e motor a combustão – que marcaram a Segunda Revolução Industrial foram as bases do desenvolvimento das economias capitalistas industrializadas. A expansão do consumo de aço – total e *per capita* – nos países desenvolvidos, em tese, refletia o contexto da expansão do consumo em massa, fruto da emergência e consolidação da acumulação intensiva baseada no modelo “fordista”. É claro que outros fatores impulsionaram o consumo mundial de aço nesse período, dentre eles: o dinamismo da indústria de bens de consumo duráveis – automóveis, eletrodomésticos e etc. – e da construção civil; e o desencadeamento do processo de industrialização em diversos países (FERREIRA, 1993; MORANDI, 1997).

A rápida expansão das economias industrializadas nos anos 1950 e 1960 favoreceu o crescimento da indústria siderúrgica mundial, o que representou um forte estímulo para a ampliação da capacidade produtiva das plantas e, conseqüentemente, a absorção de economias de escalas significativas. Contudo, apesar da renovação tecnológica associada à expansão da indústria siderúrgica nesse período, as inovações introduzidas não representaram rupturas no *modus operandi* da produção de aço, de modo que os aperfeiçoamentos dos equipamentos – altos-fornos, conversores, fornos elétricos e laminadores – se traduziram em inovações incrementais. Ferreira (1993) argumenta que foi:

[...], portanto, sobre uma base tecnológica que permaneceu estável nos seus fundamentos, que foram introduzidas mudanças técnicas que provocaram, dentre outros efeitos interdependentes: aumento do tamanho dos equipamentos e das velocidades de fabricação, redução de custos unitários de produção, aprimoramento da qualidade dos produtos etc. (FERREIRA, 1993, p. 231)

Dessa forma, no que se refere ao processo de renovação da base tecnológica da siderurgia no século XX, apenas duas das inovações de processo introduzidas e difundidas na siderurgia mundial podem ser consideradas radicais: o conversor a oxigênio e o lingotamento contínuo. A difusão desses novos métodos constitui elemento central dos esforços de modernização da siderurgia mundial desde a década de 1950. A partir destes esforços, pode-se destacar a ampliação da capacidade dos altos-fornos, que praticamente triplicou a capacidade das usinas integradas⁷.

⁷ As plantas siderúrgicas evoluíram de 600.000 toneladas/ano em 1950 para 2 milhões em 1975 e, hoje, pode-se encontrar plantas que superam a capacidade de 10 milhões de toneladas/ano. Para uma descrição detalhada da expansão por etapa do processo produtivo ver Ferreira (1993).

A fabricação do aço em conversores a oxigênio (*basic oxygen furnace*, BOF) foi desenvolvida no início da década de 1950 pela siderúrgica austríaca Vöest-Alpine. Em função de os experimentos terem sido realizados nas usinas de Linz e Donawitz, o processo também ficou conhecido como a inicial das duas usinas, LD. Segundo De Paula (1998), as principais desvantagens dos fornos Siemens-Martin frente ao novo padrão tecnológico, o conversor LD, são o prolongado tempo de corrida do aço - 6 a 8 horas, em comparação com 45 minutos do conversor LD -, o alto custo do equipamento e sua baixa produtividade (Ton/Hh)⁸.

A substituição das tecnologias dos fornos Siemens-Martin e dos conversores Bessemer já foi concluída em vários países, inclusive no Brasil (Tabela 1). No ano de 2017, 71,6% da produção mundial de aço bruto foi processada em conversores a oxigênio, sendo que o restante, 28,0%, originaram-se de fornos elétricos a arco e apenas 0,4% dos processos Bessemer e Siemens-Martin⁹ – conhecidos na literatura siderúrgica como *Open Heart Furnaces* (OHF). No Brasil, em particular, 77,6% da produção de aço bruto originou-se da tecnologia de conversores a oxigênio, 21,0% dos fornos elétricos a arco e apenas 1,4% do processo EOF¹⁰ – *Energy Optimizing Furnace*, desenvolvido originalmente pelo grupo Korf em sua usina Companhia Siderúrgica Pains, hoje pertencente à Gerdau.

Tabela 1 – Comparativo da produção de aço bruto mundial e brasileira por tipo de aciaria, de 1985 a 2017 (%)

	Tipo de Aciaria	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2017
Mundo	Básica a oxigênio (BOF)	55,9	56,8	57,9	59,2	63,5	69,8	71,6
	Fornos elétricos a arco (EAF)	24,6	27,5	31,8	33,6	33,2	29,0	28,0
	Bessemer e Siemens-Martin (OHF)	19,4	15,5	8,1	4,5	3,2	1,2	0,4
	Outros	0,1	0,1	2,2	2,7	0,1	0,0	0,1
Brasil	Básica a oxigênio (BOF)	69,7	74,0	78,2	79,5	75,4	74,7	77,6
	Fornos elétricos a arco (EAF)	25,9	23,8	20,2	19,1	22,8	23,7	21,0
	Bessemer e Siemens-Martin (OHF)	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Outros	0,0	2,2	1,5	1,4	1,7	1,5	1,4

Fonte: *World Steel Association* (WSA). Elaboração própria.

⁸ Segundo Soares (1989 *apud* de Paula, 1998), uma aciaria com conversor LD de 300 toneladas por corrida (40 minutos) podia ser operada com 200 metalúrgicos, enquanto as antigas aciarias com fornos Siemens-Martins, para produzirem essa mesma quantidade de aço, demandavam 12 fornos, 450 operadores e um tempo de corrida de 8 a 12 horas. Desse modo, a produtividade das aciarias equipadas com a nova tecnologia era superior em, aproximadamente, 27 vezes.

⁹ Cabe ressaltar que, neste último caso, a produção concentrou-se na Ucrânia (23,0%) e Rússia (2,4%).

¹⁰ O forno EOF é um processo de produção de aço por sopro combinado de oxigênio que permite um pré-aquecimento de sucata. Injeta-se oxigênio horizontalmente no banho líquido por ventaneiras submersas, ao mesmo tempo em que se sopra oxigênio na atmosfera do forno, através de injetores refrigerados (WEBER & PFEIFER, 1987 *apud* DE PAULA, 1988, p. 279). Dentre as vantagens dessa tecnologia estão: a flexibilidade da carga, aceitando-se maior variedade na proporção de gusa líquido e sucata no forno; e o reduzido tempo de corrida.

A tecnologia do lingotamento contínuo data também da década de 1950, tendo se difundido aceleradamente nas décadas posteriores, conforme Tabela 2. Atualmente a adoção desta tecnologia se traduz em um dos principais indicadores de atualização tecnológica da indústria siderúrgica. Esta tecnologia apresenta inúmeras vantagens em relação ao lingotamento convencional (utilizando-se lingoteiras), dentre elas: maior rendimento semiacabado/aço líquido, em torno de 12%; é mais compacta, uma vez que elimina a utilização de lingoteiras, fornos-poço e laminador primário, ao moldar o aço diretamente na forma de semiacabados; confere melhor qualidade ao produto final; e possibilita uma redução de, pelo menos, 50% da mão-de-obra (SOARES, 1989; DE PAULA, 1998). Em síntese, o processo de lingotamento contínuo propicia menor consumo de energia, maior rendimento dos insumos, melhor qualidade do aço e menores requisitos de mão-de-obra.

Tabela 2 - Participação do lingotamento contínuo na produção mundial de aço bruto, segundo regiões e países selecionados 1985-2017 (%)

Regiões e Países	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2017
União Europeia	69,8	89,7	93,7	96,2	96,7	96,7	96,5
EUA	44,4	67,4	91,1	96,4	96,8	97,4	99,6
América do Norte	44,7	68,1	90,4	96,4	97,2	98,0	95,6
Brasil	43,7	58,5	63,4	90,2	92,4	96,6	97,9
América do Sul	48,0	62,2	69,4	91,1	93,6	96,7	98,3
China	10,8	22,3	46,5	87,3	97,0	98,1	98,7*
Japão	91,1	93,9	95,8	97,3	97,7	98,2	98,5*
Coréia do Sul	63,3	96,1	98,2	98,6	98,1	98,0	98,7
Ásia	60,5	65,9	74,3	90,5	95,2	96,2	97,5
Mundo	46,3	60,0	75,8	87,1	91,5	94,9	96,2

Fonte: *World Steel Association* (WSA). Elaboração própria.

Nota: (*) dados estimados.

A terceira fase da Revolução Industrial representa um ponto de inflexão para a indústria siderúrgica. A forte retração da demanda e a elevação dos preços das matérias-primas básicas, durante as décadas de 1970 e 1980, acabaram por direcionar os esforços tecnológicos do setor. A busca por redução de custos, diferenciação de produtos, melhoria de qualidade e fabricação em lotes menores desencadearam o surgimento de uma nova rota tecnológica, as miniusinas – *mini mills*. Segundo De Paula (2012), as *mini mills* apresentam uma maior flexibilidade do ponto de vista operacional e econômico, uma vez que a variação da demanda é menos onerosa e requer menor intensidade de capital do que uma usina integrada a coque.

De acordo com Morandi (1997), na década de 1990 a crescente preocupação com o meio ambiente, somado à busca de uma maior compactação das usinas, alterou significativamente as

estratégias da indústria siderúrgica que vigoravam até então. Diante deste novo cenário, as estratégias do setor siderúrgico foram focalizadas na direção da customização, satisfazendo as necessidades específicas de cada cliente, tais como: qualidade, composição, tamanho, lotes reduzidos, prazos de entrega, etc. Em resumo, a siderurgia buscou se adaptar às novas necessidades do mercado, incorporando características que são comuns a vários outros setores industriais que marcam o período recente.

Ademais, a siderurgia é um setor *demand pull*, em que as necessidades dos consumidores guiam os esforços tecnológicos, diferentemente dos setores *technology push*, que se caracterizam por rápidas e grandes transformações tecnológicas (FURTADO *et alii*, 2000). Apesar de ser um exemplo habitual de indústria madura, no qual as rupturas tecnológicas são pouco frequentes, a siderurgia é um setor em que as inovações de processos são relevantes para a modernização da base tecnológica.

Nesse sentido, Holleis (1994) afirma que as forças que direcionam as inovações de processo nesta indústria são: o aumento de produtividade; a economia e flexibilidade na utilização das matérias-primas; o potencial de aprimoramento de qualidade; o encurtamento do fluxo e dos tempos de processamento; a integração da planta produtiva; a preocupação com o meio ambiente; a economia de energia; e baixo custo do investimento. Em síntese, busca-se reduzir o número de ativos fixos nas usinas siderúrgicas, a fim de obter menores exigências de capital e custos operacionais.

Entretanto, a escassez de inovações disruptivas na siderurgia mundial não significa que inexistam alternativas de grande potencial em desenvolvimento ou em operação. Por representar um processo contínuo, esta indústria é altamente dependente da unificação de processos de produção distintos, mas interdependentes, de modo que as inovações incrementais buscam a integração dos vários processos em que se divide a atividade de produção do aço – ou entre as unidades de uma planta - que seria realizada de forma cada vez mais contínua (FERREIRA, 1989, 1993; DE PAULA, 2003, 2012; FURTADO *et alii*, 2000; PINHO, 2001).

Posto isto, as inovações radicais na siderurgia, que se traduzem em saltos tecnológicos, baseiam-se numa trajetória de compactação de processos: o *thin-slab-casting* e os processos alternativos de produção de ferro primário (HOLLEIS, 1994; NOLDIN JR., 2011; DE PAULA, 2012). Os equipamentos de *thin-slab-casting* buscam substituir o laminador de tiras a quente, o mesmo acontecendo com os processos alternativos de produção de ferro primário em relação ao alto-forno, reduzindo, assim, os investimentos e os custos operacionais desta indústria. O

laminador de tiras a quente assim como o alto-forno são exatamente os principais equipamentos nos quais as economias de escala são mais preponderantes em uma usina integrada a coque.

A partir da tecnologia de lingotamento contínuo de placas finas (*thin-slab-casting*, para aços planos) é possível fabricar produtos com espessuras de 50 a 60 mm, além de aumentar a velocidade da máquina de lingotamento para 5 a 10 metros/minutos. Segundo De Paula (2012), o desenvolvimento da tecnologia *flying gauge change*, que permite a troca de espessura durante o processo, possibilitou a fabricação de bobinas laminadas a quente com espessura igual ou inferior a 1 mm. Ademais, ressalta-se que a tecnologia de *thin-slab-casting* possibilitou a fabricação de aços planos a partir de aciarias elétricas, o que vale dizer que esse processo capacitou as *mini-mills* atuarem no segmento de planos, concorrendo com as usinas integradas a coque em uma maior gama de produtos.

No que concerne aos processos alternativos de produção de ferro primário, segundo De Paula (2012), pode-se segmentar em duas gerações: a) os processos de redução direta já consolidados; b) os processos emergentes alternativos ao alto-forno, muitas vezes agrupados sob o rótulo genérico de “fusão redutora”.

A tecnologia de redução direta, amplamente difundida, permite a produção de ferro-esponja – usualmente denominado ferro diretamente reduzido (DRI) – ou do ferro briquetado a quente (HBI). Os dois produtos são bastantes similares, sendo que o HBI é fabricado para utilização em outras plantas siderúrgicas (consumo externo), enquanto o DRI é consumido internamente, face aos problemas de periculosidade no seu transporte. Ambos os materiais são consumidos em fornos elétricos como substituto parcial à sucata, com a vantagem de conter menos enxofre e fósforo, permitindo assim, a produção de aços com menor grau de contaminantes e, conseqüentemente, de maior valor agregado, a partir de uma aciaria elétrica (DE PAULA, 2012).

Apesar de ser uma tecnologia provada e consolidada, a redução direta representou no ano de 2017 apenas 7,5% da produção mundial de ferro primário. Em termos de quantidade do volume produzido, dois processos sobressaíram em 2017: Midrex (64,8%) e HyL (16,9%), ambos à base de gás natural. Outras tecnologias, com o emprego de carvão ou outros gases, foram responsáveis por 18,3% do DRI/HBI produzidos (MIDREX, 2018). É importante destacar que, assim como o lingotamento contínuo, a redução direta permitiu a diminuição da escala mínima eficiente de operação da siderurgia.

O Quadro 3 apresenta algumas características da segunda geração de processos alternativos ao alto-forno. De um modo geral, as principais vantagens dessas novas tecnologias

são: a) o aumento de flexibilidade operacional em comparação com o alto-forno, que funciona por período superior a 15 anos e raramente opera com menos de 80% de sua capacidade produtiva; b) a redução da escala mínima ótima de uma usina siderúrgica e a consequente diminuição das barreiras à entrada; c) o decréscimo do custo de capital, em grande medida relacionado à eliminação de coquerias e sinterização; d) a diminuição do consumo energético e do impacto ambiental (DE PAULA, 2003).

Quadro 3 – Processos Alternativos de Redução

Carga de ferro	Redutor Primário		Tipo de Produto
	Carvão	Gás Natural	
Pelotas/Lump	AISI COREX		Metal Líquido
Aglomerado Auto-Redutor	TECNORED OXICUP ITMK3, Hi-Q- IP (<i>nuggets</i>)		
Finos	HISMELT, DIOS ROMEL, AUSIRON FINEX		
Pelotas/Lump	SL/RN, DRC ACCAR	HYL MIDREX	Ferro Esponja (DRI)
Aglomerado Auto-Redutor	SL/RN, DRC ACCAR		
Finos	CIRCOFER PRIMUS(*)	CIRCORED, IC (Fe ³ C) FINMET	

Fonte: NOLDIN Jr (2011). Elaboração própria.

Nota: (*) Não estão considerados os processos de fusão à jusante.

Noldin Jr. (2011) observa que os processos Midrex e HyL foram as primeiras tecnologias implementadas em escala comercial e, atualmente, já se encontram num estágio avançado de maturidade tecnológica. Os processos Corex e Finex encontram-se em estágio de consolidação comercial e têm apresentado bons resultados, segundo os responsáveis por suas tecnologias, em suas plantas comerciais implementadas (África do Sul e Coréia do Sul, respectivamente). Por sua vez, outros ainda se encontram em fase de demonstração de suas tecnologias (Tecnored, Hismelt, Rotary Hearth Furnace/RHF, High-Quality Iron Pebble/Hi-QIP).

Ademais, uma nova rota tecnológica vem merecendo destaque: a produção de ferro primário através do uso de Hidrogênio como agente redutor. O processo combina a redução de óxidos de ferro com Hidrogênio gerando H₂O, diminuindo ou mesmo eliminando as emissões de CO₂, representando, assim, menor impacto ambiental. Atualmente há três grandes projetos

em curso, o Hybrit na Suécia (SSAB, LKAB e Vattenfall), o H2Future na Áustria (Voestalpine), e o Salcos na Alemanha (Salzgitter). Estes projetos visam substituir a dupla alto-forno/conversor por reatores de redução direta via H₂ e fornos elétricos a arco (NOLDIN JR., 2018).

A complexidade do processo siderúrgico e a heterogeneidade em relação ao aparato produtivo de cada usina abre um importante espaço para o constante aprimoramento das tecnologias de processo. A bem da verdade, inúmeras inovações incrementais têm contribuído para a elevação gradativa, mas substancial, dos indicadores de qualidade, rendimento energético e das matérias-primas, e produtividade dos equipamentos e da mão-de-obra (PINHO, 2001).

Segundo CGEE (2010), a tecnologia de produção de ferro-gusa em altos-fornos a coque é otimizada e encontra-se em um estado avançado, no qual os desenvolvimentos incrementais não ultrapassam 1% ao ano. Ademais, o padrão tecnológico dos altos-fornos não permite ganhos adicionais de eficiência superiores a 10% frente aos níveis atuais. As principais inovações incrementais que merecem destaque, são:

- i. O aumento das campanhas (acima de 20 anos), em função da melhoria dos revestimentos refratários, do uso de painéis (*staves*) e do controle do desgaste dos cadinhos;
- ii. As injeções de carvão pulverizado (PCI) e co-injeção (gás natural, óleo, plásticos, entre outros) pelas ventaneiras dos altos-fornos;
- iii. O incremento da produtividade, como decorrência de instrumentação e automação e sistema de distribuição de carga (topo sem cone/*bells-less top*);
- iv. O aproveitamento energético do gás de topo (co-geração);
- v. A granulação de escória (coproduto);
- vi. Melhoria operacional dos regeneradores;
- vii. Melhoria no controle de qualidade do coque e introdução do conceito de frações menores de coque (*small coke*).

Na etapa de refino e laminação, a introdução de novos equipamentos tem propiciado o enobrecimento do *mix* de produção. Na fabricação do aço, houve uma disseminação e sofisticação das técnicas de refino secundário do aço (ou metalurgia de panela), possibilitando um ajuste fino de temperatura e composição química, características essenciais aos aços nobres. As inúmeras inovações incrementais também permitiram melhorar a eficiência dos conversores,

tais como a utilização de gás natural nas ventaneiras de fundo, a modelagem matemática e o controle dinâmico dos processos (CGEE 2010, p. 52).

Entretanto, o impacto destas inovações vem apresentando sinais de esgotamento. O tempo média de corrida (*tap-to-tap*) do conversor, por exemplo, tem se mantido entre 38 e 45 minutos por mais de uma década. O mesmo ocorre com o índice de vazamento direto e de acerto de fósforo e carbono, que se encontram entre 75% e 90%, respectivamente. Estes indicadores estão diretamente relacionados à produtividade do conversor LD e que, portanto, têm se mostrado mais ou menos estáveis (DE PAULA, 2012).

De Paula (2012) afirma que, conjuntamente com a metalurgia de panela, os aperfeiçoamentos realizados nos fornos elétricos a arco (FEA) - incremento da potência específica¹¹ - têm permitido o aprimoramento dos parâmetros operacionais, não apenas no que diz respeito a eficiência energética e tempo de corrida (*tap-to-tap*), mas também em relação à melhoria da qualidade do produto. Nesse sentido, destacam-se: os aperfeiçoamentos nos sistemas de pré-aquecimento de sucata, que têm contribuído para um menor consumo de energia elétrica no processo; e a técnica de espumação controlada das escórias, que tem possibilitado um aumento substancial da produtividade.

Ademais, a maior oferta de matérias-primas substitutas à sucata (ferro-gusa sólido e pré-reduzidos) tem permitido a produção de aços especiais de melhor qualidade (*clean steels*) em aciarias elétricas. O uso de ferro-gusa líquido nos fornos elétricos a arco, tem contribuído na fabricação de uma maior gama de aços nobres, além de impulsionar uma nova rota tecnológica – combinação do alto-forno a carvão vegetal e aciaria elétrica (CGEE, 2010).

No que diz respeito à tecnologia de lingotamento contínuo, esta encontra-se praticamente estabilizada para os produtos de seções relativamente grandes (placas de 200 a 250 mm de espessura, e tarugos quadrados a partir de 100 mm de dimensão). Além disso, a lingotabilidade do aço e o sequenciamento de corridas estão relativamente controlados, de modo que, o número de corridas produzidas em sequência está praticamente limitado pela quantidade de determinado grau de aço a ser produzido e não pela tecnologia em si. Desse modo, como mencionado anteriormente, atualmente os esforços tem se concentrado no aprimoramento do lingotamento de placas finas (CGEE, 2010).

¹¹ Na década de 1960 a potência padrão dos fornos elétricos variava entre 250-400 kVa, com consumo específico de 800-1000 Kwh/tonelada de aço. A partir da década de 1990, começaram a se difundir fornos ultra-alta potência (UHP), com potência de 550-800 kVa, com consumo específico em torno de 410 Kwh/tonelada de aço. Hoje, estes equipamentos têm apresentado índice de consumo de energia elétrica em torno dos 400 kWh/tonelada de aço, com tendência de queda (360-300 kWh/tonelada de aço), em face da incorporação de mais energia química complementar no processo – injeções de combustíveis e oxigênio (DE PAULA 1996; 2012)

Na etapa de laminação, os aperfeiçoamentos, tanto nas usinas integradas a coque como nas semi-integradas, têm proporcionado o aumento das velocidades de operação e maior precisão em relação aos parâmetros de qualidade do produto final, exigindo das siderúrgicas conhecimento mais profundo sobre as características fenomenológicas dos aços. Segundo De Paula (2012), recentemente três importantes conceitos foram introduzidos nesta etapa, a saber:

- i. Linhas de laminação sem fim (*endless rolling*): união dos esboços através de solda durante o processamento no trem de laminação, permitindo eliminar tempos mortos entre laminações sucessivas de esboços e reduzir os problemas de variações de temperatura, agarramento do esboço pelos cilindros e bobinamento de produtos;
- ii. Lingotamento e laminação sem fim (*endless casting and rolling*): o aço é lingotado continuamente, uniformizando a temperatura do tarugo, sendo a seguir laminado e tratado termicamente em uma única linha de produção conectada;
- iii. Linha de laminação com pré-formas (*beam blank*): utilização de pré-formas lingotadas continuamente como matéria-prima dos laminadores de perfis.

Com o avanço da microeletrônica, a introdução de dispositivos microeletrônicos de automação na laminação, mas não exclusivamente nesta etapa, tem permitido a redução da variabilidade dos processos de fabricação do aço, com a consequente homogeneização de suas propriedades físicas e mecânicas, tais como resistência, espessura, acabamento superficial e conformabilidade, constituindo-se em uma das direções do progresso técnico nesta indústria. Nas demais etapas do processo produtivo, a progressiva automatização do fluxo produtivo viabiliza o controle mais acurado do processo, flexibiliza a operação de alguns equipamentos e favorece o aumento substancial da produtividade.

Ademais, é importante analisar a relação cliente-fornecedor à montante e à jusante da cadeia produtiva de aço, de modo que seja possível entender os esforços tecnológicos das siderúrgicas, tanto em processo como em produto. Como observado, a siderurgia é um setor tipicamente guiado pela demanda, cabendo frequentemente aos clientes mais sofisticados¹² requisitar inovações, cada vez mais desenvolvidas em parcerias entre as siderúrgicas e seus clientes.

¹² Notadamente o complexo automotivo, o setor da construção civil e o setor de bens de capital.

Nesse sentido, a intensidade dos esforços tecnológicos varia consideravelmente entre os segmentos de produtos siderúrgicos, em resposta aos graus diferenciados de exigência dos consumidores. É maior no caso dos aços especiais em geral e bem menor na maior parte dos laminados longos comuns. Mesmo no núcleo deste último segmento há oportunidades distintas para desenvolvimento de tecnologia de produto. Alguns exemplos de inovações de produtos, segundo Silva e De Carvalho (2016), incluem: aços de baixa liga de alta resistência (high-strength low-alloy - HSLA); aços elétricos eficientes; aços resistentes à corrosão; e aços com melhor resistência ao calor.

Para fins desta Dissertação, cabe ressaltar também a importância da interação entre siderúrgicas e fornecedores de equipamentos especializados. Como apontado por Furtado *et alii* (2000), em setores maduros como a siderurgia, a inovação muitas vezes ocorre pela incorporação de inovações oriundas de outras indústrias, como de informática, mecânica, de equipamentos, etc. Nesta indústria, em que a tecnologia se encontra intensamente incorporada nos equipamentos, é crítica a importância do relacionamento das siderúrgicas com os fabricantes de bens de capital sob encomenda.

Pinho e Lopes (2000) observaram que este relacionamento não está restrito apenas ao período de especificação e implementação de um novo projeto. A atualização e a realização de modificações em equipamentos e instalações produtivas, bem como a introdução de inovações incrementais nesta indústria, são atividades que requerem estreita colaboração com os fabricantes de equipamentos. Indo além, estes mesmos autores ressaltam que uma parcela essencial das competências exigidas para o desenvolvimento de tecnologia na siderurgia reside no conhecimento tácito dos fornecedores de equipamentos especializados do setor.

Segundo Pinho (2001), na segunda metade do século passado, as principais inovações na tecnologia de processo siderúrgico - o conversor básico a oxigênio e o lingotamento contínuo – foram desenvolvidas em iniciativas que conjugaram os esforços e as capacitações dos produtores siderúrgicos, de produtores de equipamentos e de institutos públicos de pesquisa. Essas evidências, portanto, corroboram a existência de um processo de interação entre os fornecedores de equipamentos e os fabricantes de aço, e a importância dessa interação no tocante ao desenvolvimento tecnológico desta indústria.

De Paula (2012) destaca que, historicamente, as empresas siderúrgicas têm dedicado uma parcela cada vez maior dos gastos em P&D para novos produtos, relegando os esforços de desenvolvimento de tecnologias de processos para empresas de engenharia e produtoras de equipamentos. Isso ocorre não apenas por causa da maior especialização intra-setorial, mas

também está diretamente relacionado à apropriabilidade do progresso tecnológico, ou seja, à possibilidade de ganhos financeiros de uma inovação bem-sucedida.

Na indústria siderúrgica, a apropriabilidade é maior quando se trata de inovações de produto comparativamente à de processos. Segundo Pinho (2001), uma evidência disso é que:

[...] quando empresas inovadoras passam a produzir e comercializar equipamentos que incorporam as mudanças tecnológicas, estão reconhecendo, ao menos implicitamente, a baixa apropriabilidade da tecnologia e a incapacidade de deter iniciativas de imitação. Nessas circunstâncias, a melhor opção para rentabilizar os investimentos realizados no desenvolvimento da inovação tende a ser a adoção de uma estratégia que combina ativamente comercialização de equipamentos e transferência de tecnologia (PINHO, 2001, p. 165).

Esse processo é reflexo do maior dinamismo da demanda nos nichos de mercado em que é possível desenvolver novas especificações, além da possibilidade de estabelecer vínculos duradouros com clientes e a consequente possibilidade de praticar preços mais elevados, determinando, assim, os esforços em desenvolver novas variedades de aço, ou ainda, técnicas que melhorem as aplicações de aços com especificações já conhecidas. Por outro lado, o peso crescente dos fabricantes independentes de equipamentos siderúrgicos, como a italiana Danieli e a alemã SMS Group, sugere que a apropriabilidade da tecnologia de processo na siderurgia esteja reduzindo ainda mais (PINHO, 2001).

As condições apontadas anteriormente tendem a induzir uma estratégia tecnológica mais tímida por parte das empresas siderúrgicas, especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento de tecnologias de processo. Como observado, os desenvolvimentos tecnológicos em processo caracterizam-se pelo risco elevado e pelo longo tempo de maturação, estando restritos às siderúrgicas japonesas e europeias e aos produtores de bens de capital.

Isso retrata a baixa intensidade de gastos em P&D da siderurgia, comparativamente a outros setores industriais tecnologicamente dinâmicos, reforçando a condição de maturidade tecnológica desta indústria. Referências recentes evidenciam que não têm ocorrido alterações relevantes nesse aspecto. Silva e De Carvalho (2016) apresentam vários dados, ao longo do período 1995 a 2009, que comprovam que a intensidade de P&D da siderurgia foi relativamente baixa em comparação com a média da indústria manufatureira, em países como Alemanha, Suécia, Coreia do Sul e Japão. No caso da indústria siderúrgica japonesa, situada na fronteira tecnológica da siderurgia mundial, a intensidade de P&D/vendas na metalurgia foi de 3,8% comparado a 12,3% da indústria manufatureira.

Silva e De Carvalho (2016) também ressaltam que a intensidade de P&D na siderurgia varia consideravelmente entre os países e períodos analisados. No período de 1998 a 2007, várias economias siderúrgicas, que historicamente exibem altos níveis de intensidade de P&D, apresentaram queda em suas intensidades. Contudo, esta trajetória teria se alterado a partir de 2008. Os autores também estimaram que, para siderúrgicas de capital aberto, a importância relativa dos investimentos em P&D como proporção dos ativos totais e dos investimentos em capital foram aproximadamente de 0,7% e 20% em 2014.

Silva e De Carvalho (2016) destacam que aproximadamente 75% da amostra de companhias siderúrgicas de capital aberto não investem em P&D, enquanto um grupo restrito investe intensamente nesta atividade. Dentre os dez maiores orçamentos, destacam-se: 1) Baoshan Iron & Steel Company (China): US\$ 639 milhões; 2) Nippon Steel & Sumitomo Metal (Japão): US\$ 573 milhões; 3) Posco (Coreia): US\$ 502 milhões; 4) Shanxi Taigang Stainless Steel (China): US\$ 372 milhões; 5) JFE Steel (Japão): US\$ 296 milhões. Além disso, é importante ressaltar que a ArcelorMittal, maior siderúrgica mundial, ocupou apenas a oitava posição, com investimento de US\$ 259 milhões.

Como ressaltado, historicamente os esforços de P&D da siderurgia tem sido direcionados ao desenvolvimento de produtos mais nobres e de redução de custos, por meio de inovações incrementais nos processos siderúrgicos. Silva e De Carvalho (2016) constatarem que a atividade de patenteamento, tanto em termos absolutos e relativos, tem sido historicamente maior em aços galvanizados, um produto de alto valor agregado. Entretanto, a participação relativa das patentes relacionadas a este produto regrediu de 5% em 1970 para menos de 2% em 1983, voltando a crescer até alcançar 12% em 2012. Outro tipo de aço destacado pelos autores são os aços ligados (*alloy steel*), que vem apresentando uma trajetória de crescimento desde 2000, tendo sua participação relativa superado a de aços galvanizados em 2012 (13%).

Ademais, Silva e De Carvalho (2016) também discutem as patentes na siderurgia por quatro tipos de processos, a saber: produção de ferro primário, fabricação de aço, laminação e fabricação de produtos laminados. Os autores concluem que existe uma alta correlação entre o número de patentes ao longo do tempo, bem como em alguns casos há sobreposição entre elas, o que equivale a dizer que uma mesma patente pode ser aplicada em mais de uma etapa do processo produtivo. Cumpre destacar que o número de patentes nas etapas a jusante da cadeia produtiva do aço – laminação e produtos laminados – tem sido recorrentemente superior que nas demais etapas do processo produtivo. Essa característica reflete as estratégias de inovação

da indústria siderúrgica, que como destacado, estão concentradas em atividades relacionadas a novos produtos e aperfeiçoamento dos existentes.

Por fim, Silva e De Carvalho (2016) indicam que como esperado, muitas das invenções e inovações na indústria siderúrgica são realizadas por empresas de outros setores. Além disso, a atividade de patenteamento na siderurgia é altamente concentrada em um número muito pequeno de organizações. Dentre as cem empresas que mais depositaram patentes relacionadas ao aço, até 2012, 90% eram companhias não siderúrgicas. As empresas siderúrgicas detinham 32% do estoque de patentes pertencentes à lista da cem maiores, o que ratifica a predominância de tecnologias desenvolvidas externamente. No âmbito das empresas que mais depositaram patentes relacionadas à siderurgia no mundo, apenas quatro eram produtoras de aço: JFE Steel, Nippon Steel & Sumitomo Metal, Kobe Steel e Posco. Em relação aos produtores de equipamentos siderúrgicos, duas grandes produtoras alemãs estavam presentes nessa lista, a Siemens e SMS Siemag.

De modo geral, buscou-se, neste capítulo, apresentar a dinâmica tecnológica do setor siderúrgico. Em relação ao processo inovativo, constatou-se que a siderurgia é uma indústria madura, onde as inovações radicais são pouco frequentes e as inovações incrementais apresentam maior relevância para o desenvolvimento da base tecnológica. As inovações incrementais desenvolvidas no interior das siderúrgicas e oriundas da prática operacional – em processos, organização da produção, equipamentos e produtos – constituem uma característica fundamental do progresso técnico da indústria siderúrgica mundial. Ademais, os fornecedores de equipamentos siderúrgicos representam o elemento central no desenvolvimento de tecnologias de processos, enquanto as siderúrgicas estão empenhadas em ofertar novos produtos. Assim, para os produtores siderúrgicos torna-se fundamental desenvolver suas competências tecnológicas, de modo que sejam capazes de empreender atividades de inovações e, conseqüentemente, aumentar e manter a competitividade do setor.

CAPÍTULO 2: PANORAMA DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

O objetivo deste capítulo é apresentar algumas nomenclaturas relativas aos produtos e processos siderúrgicos, que serão recorrentemente abordados ao longo desta Dissertação. A primeira seção apresenta os principais produtos siderúrgicos, as etapas produtivas e descreve, sucintamente, as rotas tecnológicas existentes, atentando, neste último caso, para as especificidades das usinas integradas a coque e semi-integradas. A segunda seção é destinada a um breve resumo do panorama atual da siderurgia mundial. A terceira seção tem como finalidade apresentar o cenário atual da siderurgia brasileira e suas peculiaridades.

2.1. Produtos, etapas produtivas e rotas tecnológicas

Os produtos siderúrgicos são comumente classificados em semiacabados e acabados - laminados. Os semiacabados são produtos oriundos do processo de lingotamento contínuo ou de laminação de desbaste, destinados a posterior processamento de laminação ou forjamento a quente (IABr, 2018a). Dividem-se em placas, blocos e tarugos e são consumidos diretamente pelas empresas siderúrgicas para produzir os laminados – produtos planos e longos. Além disso, os semiacabados são demandados, em menor escala, por fabricantes inseridos na cadeia metal-mecânica.

Os laminados, por sua vez, podem e são utilizados diretamente por consumidores finais, nas mais diversas aplicações. Eles se dividem em quatro segmentos principais: laminados planos ao carbono, laminados planos especiais/ligados, laminados longos ao carbono e laminados especiais/ligados. Os produtos planos são produtos siderúrgicos resultantes do processo de laminação, cuja conformação física caracteriza-se pela largura extremamente superior a espessura, e são comercializados na forma de chapas e bobinas de aço carbono e especiais. Além disso, os produtos siderúrgicos do segmento de planos ao carbono podem ser subdivididos em revestidos e não revestidos, podendo apresentar ou não revestimento anticorrosivo. O revestimento pode ser feito a partir de diversos materiais, destacando-se o zinco para chapas galvanizadas, o estanho para folhas-de-flandres e o cromo para as chapas cromadas.

Os laminados longos se diferenciam por sua conformação física, com um acentuado predomínio da dimensão comprimento sobre as demais, como largura e espessura (PINHO,

1993 *apud* DE PAULA, 2012). Do ponto de vista da composição química, os segmentos de planos e longos são divididos em aços ao carbono e especiais.

Os aços carbono são aços ao carbono, ou com baixo teor de liga, de composição química definida em faixas amplas (IABr, 2018). Também são usualmente conhecidos como aços de baixa liga. Já os aços especiais/ligados podem ser classificados conforme o método utilizado, não apresentando, portanto, um critério definido na literatura setorial. Dentre os métodos usuais para classificar os aços especiais/ligados, destacam-se: a) as classificações baseadas nas características dos aços especiais ou ligas, por exemplo, propriedades ou composição química; b) as classificações baseadas no emprego do aço ou liga, como aços para ferramenta e aços para construção mecânica; c) as classificações baseadas em complexidade do processo produtivo, por exemplo, aços trabalhados a frio ou a quente, aços fundidos ou aços sinterizados.

Quanto à composição química, aços ligados/especiais são aços ligados¹³ ou de alto-carbono, de composição química definida em faixas estreitas para todos os elementos e especificações rígidas (IABr, 2018a). São preferidos aos aços carbono sempre que sua aplicação requer melhor desempenho em situações adversas, como por exemplo: boa conformabilidade em temperaturas extremamente baixas ou elevadas, maior resistência a corrosão, maior resistência mecânica, etc. Em contrapartida, por incorporar maior conteúdo tecnológico, os aços ligados/especiais apresentam preços mais elevados em comparação com os aços ao carbono. O Quadro 4 apresenta os produtos mais representativos de cada segmento.

¹³ O termo aço ligado refere-se a compostos de ferro-carbono com algum outro elemento químico (cromo, molibdênio, silício, titânio, vanádio, etc.) que lhes confira determinadas propriedades, sendo, portanto, sinônimo de aços especiais.

Quadro 4 – Segmentos e produtos siderúrgicos

Segmento	Aços Carbono	Especiais/Ligados
Laminados Planos Comuns Não Revestidos	<ul style="list-style-type: none"> • Bobinas e chapas grossas do laminador de tiras a quente – LTQ • Bobinas e chapas grossas do laminador de chapas grossas – LCG • Bobinas e chapas finas laminadas a quente (BQ/CFQ) • Bobinas e chapas finas laminadas a frio (BF/CFF) 	
Laminados Planos Comuns Revestidos	<ul style="list-style-type: none"> • Folhas estanhadas e folhas cromadas - folhas para embalagem • Bobinas e chapas eletro-galvanizadas (<i>EG - Eletrolytic Galvanized</i>) • Bobinas e chapas zincadas a quente (<i>HDG - Hot Dipped Galvanized</i>) • Bobinas e chapas de ligas alumínio-zinco • Bobinas e chapas pré-pintadas 	
Laminados Planos		<ul style="list-style-type: none"> • Bobinas e chapas em aço ao silício - chapas elétricas • Bobinas e chapas em aços inoxidáveis • Bobinas e chapas em aço ao alto carbono • Bobinas e chapas em outros aços ligados
Laminados Longos	<ul style="list-style-type: none"> • Fio-máquina e trefilados • Trilhos e acessórios ferroviários • Tubos sem costura • Perfis • Vergalhões • Barras 	<ul style="list-style-type: none"> • Fio-máquina e trefilados • Trilhos e acessórios ferroviários • Tubos sem costura • Barras em aços construção mecânica • Barras em aços ferramenta • Barras em aços inoxidáveis e para válvulas

Fonte: IABr. Elaboração própria.

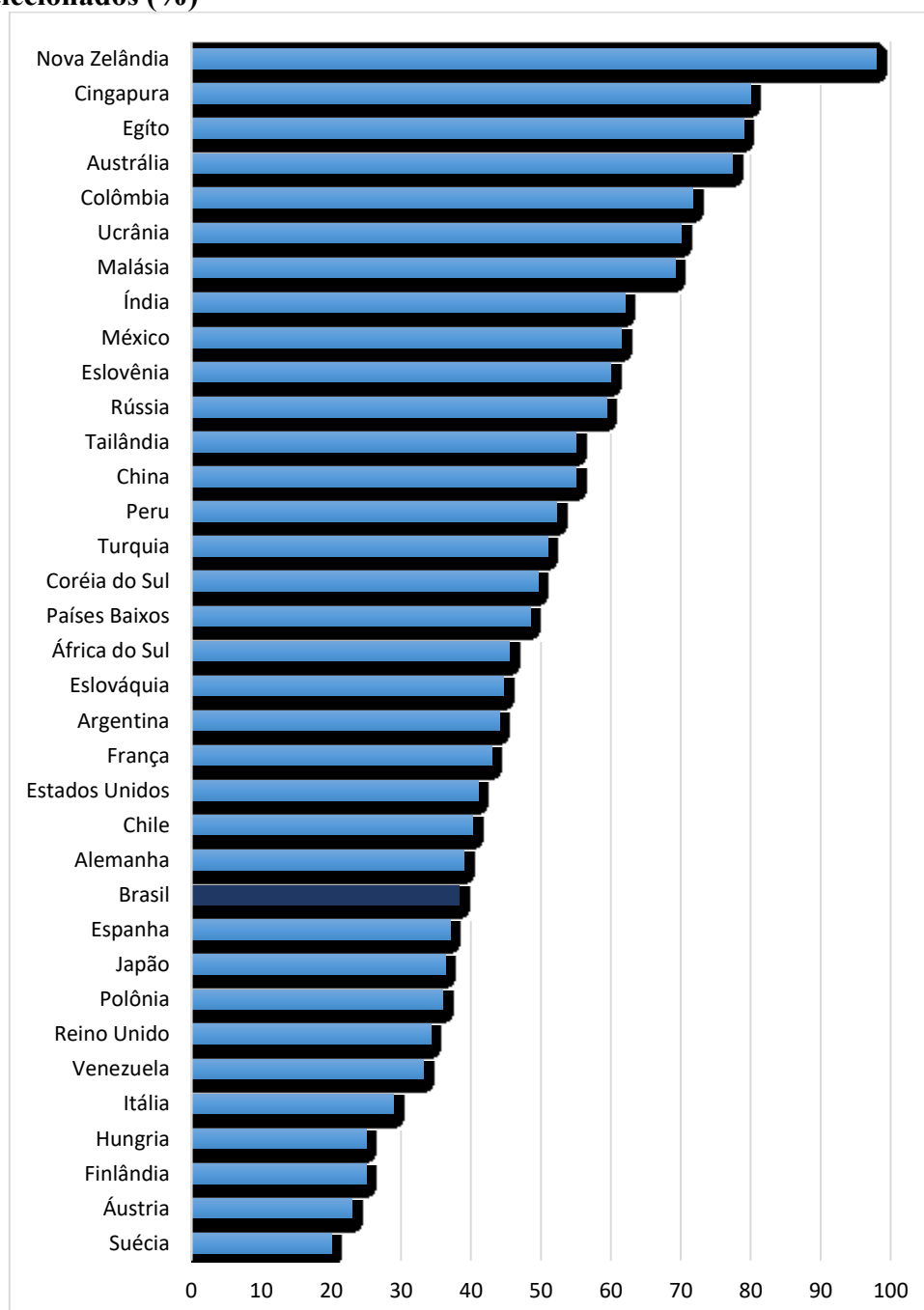
Os laminados planos possuem uma série de aplicações, destacando-se como principais consumidores a indústria de transportes (automobilística, ferroviária, naval e aviação), de máquinas e equipamentos, de utilidades domésticas, de tubos com costura ou soldados para construção pesada e de embalagens e recipientes, bem como a construção civil. Por sua vez, os laminados longos possuem aplicação diversificada em toda a cadeia metal-mecânica, embora a construção civil seja o seu maior consumidor.

Ademais, a construção civil é a atividade que apresenta maior potencial de consumo dos produtos siderúrgicos, principalmente quando se considera a necessidade de urbanização resultante do aumento populacional¹⁴. Segundo a *World Steel Association*, estima-se que, em 2017, esse setor foi responsável por 51% da demanda siderúrgica global, sendo seguido por equipamentos mecânicos (15%), automotivo (12%), produtos de metal (11%), outros

¹⁴ As projeções da Nações Unidas indicam que a população mundial deve alcançar 8,6 bilhões em 2030, e aumentar ainda mais para 9,8 bilhões em 2050, chegando em 11,2 bilhões até 2100 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2017).

transportes (5%), equipamentos elétricos e aplicações domésticas (ambos com 3%). O Gráfico 1 mostra a participação da construção no consumo de produtos siderúrgicos em países selecionados.

Gráfico 1 – Importância da construção no consumo de produtos siderúrgicos, segundo países selecionados (%)

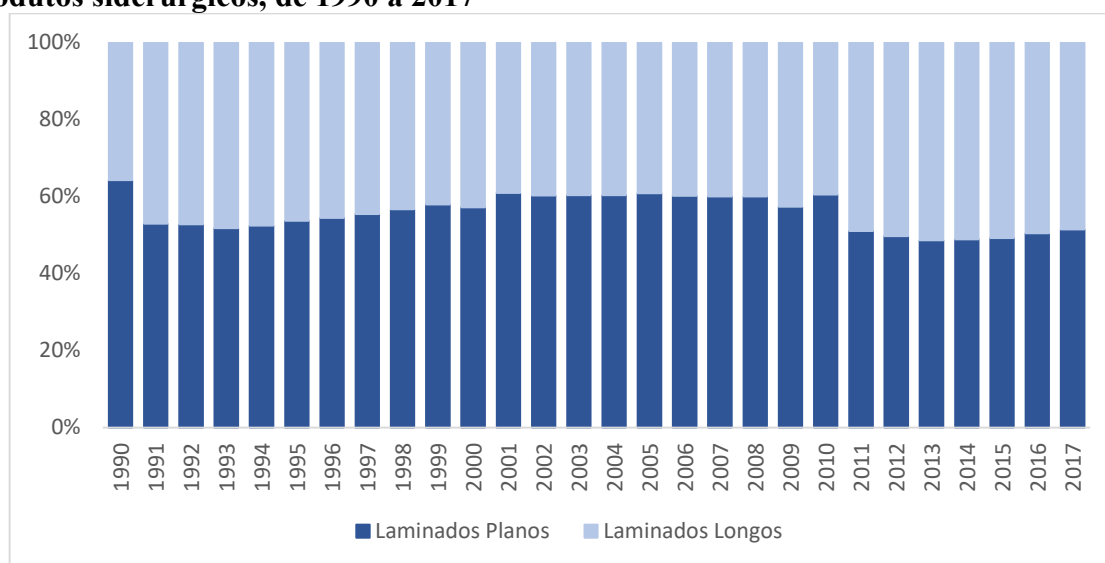


Fonte: *World Steel Association (WSA)*. Elaboração própria.

A proporção entre laminados planos e longos varia conforme o grau de industrialização dos países. Nos países em desenvolvimento o consumo e a produção siderúrgica tendem a

privilegiar os laminados longos, uma vez que seu tecido industrial é menos complexo e a construção civil têm um importante impacto na dinâmica econômica. Já os laminados planos são mais intensamente utilizados nos países desenvolvidos, onde o tecido industrial é mais complexo e setores como a cadeia metal-mecânica (em particular, a cadeia automotiva e a fabricação de máquinas e equipamentos), por exemplo, apresentam maior relevância econômica. O Gráfico 2 mostra a participação dos produtos laminados planos e longos na produção mundial de produtos siderúrgicos¹⁵.

Gráfico 2 – Importância relativa dos laminados planos e longos na produção mundial de produtos siderúrgicos, de 1990 a 2017



Fonte: *World Steel Association (WSA)*. Elaboração própria.

Constata-se que, a partir de 2011, há uma alteração relevante no *mix* de produtos, no qual a produção de laminados longos passou a liderar o mercado mundial de aço. Embora os laminados planos apresentem maior conteúdo tecnológico e, consequentemente, maior valor agregado, pode-se destacar dois fatores que levaram a essa inflexão na pauta produtiva. Em primeiro lugar, a crescente importância da siderurgia chinesa, que destinou 59% de suas vendas à construção civil e infraestrutura em 2017 (JP MORGAN, 2018). Em segundo, o menor dinamismo das economias industrializadas pós-crise de 2008, nas quais os setores mais dinâmicos tecnologicamente são os principais consumidores do segmento de laminados planos.

Os produtos siderúrgicos divergem consideravelmente no que diz respeito ao porte das empresas, à dinâmica concorrencial e ao ritmo do progresso tecnológico. Segundo De Paula

¹⁵ Em ambos os segmentos não foi computado separadamente os aços especiais/ligados, desta forma, os dados representam a produção de aço total (aços ao carbono e aços especiais/ligados).

(1998), o porte e a amplitude da pauta produtiva são elementos que exemplificam essa heterogeneidade. As siderúrgicas que atuam no segmento de laminados planos, por exemplo, se caracterizam pelo elevado tamanho das usinas, com pelo menos 2 milhões de toneladas de capacidade instalada por ano, enquanto o porte das usinas que atuam no segmento de laminados longos comuns varia entre 150 mil e 2 milhões de toneladas. Já as siderúrgicas que produzem aços especiais apresentam maior diversidade no tamanho de suas plantas, podendo variar de 30 a 800 mil toneladas. Em relação à gama de produtos ofertados por esses segmentos, os produtores de aços especiais apresentam um maior rol de produtos – em torno de 2.000, enquanto os laminados planos e longos comuns não chegam a ultrapassar, respectivamente, 300 e 15 tipos de produtos (QUEIROZ, 1987 *apud* DE PAULA, 1988).

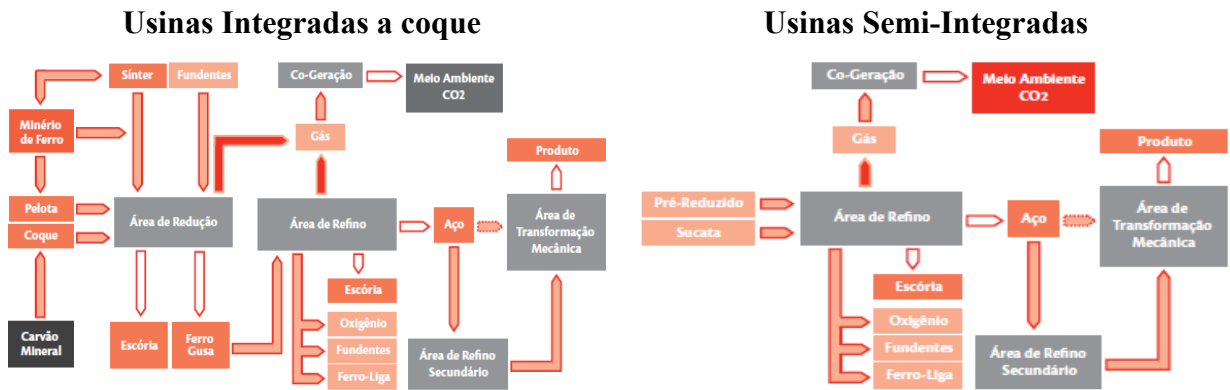
Os avanços tecnológicos nos principais consumidores de produtos siderúrgicos têm impulsionado o desenvolvimento de novos materiais, aumentando significativamente a gama de produtos ofertados, principalmente no segmento de aços especiais. Na indústria automobilística, por exemplo, 60% dos graus de aços¹⁶ existentes foram desenvolvidos a partir do século XXI. Também na construção civil, os projetos de elevada complexidade, como os modernos arranha-céus, pontes de grande porte e sofisticadas estruturas especiais, têm exigido dos produtos siderúrgicos melhores propriedades mecânicas, soldabilidade, redução de peso, acabamento e integração ambiental (CGEE, 2010).

Já no que se refere à produção do aço, existem duas rotas tecnológicas alternativas: usinas integradas e semi-integradas. A proporção dos principais insumos empregados na fabricação do aço, o minério de ferro, o carvão mineral, a sucata e a energia elétrica, varia conforme a rota tecnológica adotada em cada planta produtiva. Nas usinas integradas prevalecem o carvão mineral e o minério de ferro, enquanto as usinas semi-integradas são alimentadas principalmente com sucata ferrosa e, em menor intensidade, por ferro-gusa e pré-reduzidos (DRI e HBI).

Em 2017, a produção de aço a partir de fornos elétricos representou 27,9% da produção mundial, enquanto a produção a partir de aciaria básica a oxigênio (LD/BOF) foi responsável por 71,6%. É importante destacar que este último tipo de aciaria é predominantemente abastecida por altos-fornos. Em ambos os casos, as usinas integradas a coque e as usinas semi-integradas são as rotas tecnológicas dominantes na siderurgia mundial (WSA, 2018a). A Figura 1 sintetiza, então, o fluxo de produção dessas usinas.

¹⁶ São os aços de alta resistência (high-strength steels, HSS), aços avançados de alta resistência (advanced high-strength steels, AHSS) e aços de ultra-alta resistência (ultra-high-strength steels, UHSS).

Figura 1 – Principais Rotas Tecnológicas da Indústria Siderúrgica



Fonte: CGEE (2010)

De Paula (1996) ressalta que estas duas rotas tecnológicas contemplam uma grande variedade de opções de equipamentos, alguns dos quais são imprescindíveis para a atividade siderúrgica, como aciaria, lingotamento e laminação, ao passo que outros são opcionais, como sinterização, alto-forno e metalurgia de panela. De modo geral, o processo de fabricação do aço pode ser dividido em quatro etapas – preparação da carga, redução, refino e laminação - e varia conforme o tipo de usina (Quadro 5).

Quadro 5 – Etapas do Processo Siderúrgico e Rotas Tecnológicas

Etapas	Integrada a Coque	Integrada a Carvão Vegetal	Integrada à Redução Direta	Semi-Integrada (mini-mills)
Preparação da carga	Coqueria	NA	NA	NA
	Sinterização	Sinterização	NA	NA
	Pelotização ¹	Pelotização	NA	NA
Redução	Alto-Forno	Alto-Forno	Módulo de Redução Direta	NA
Refino	Aciaria LD	Aciaria LD	Aciaria Elétrica	Aciaria Elétrica
	Lingotamento	Lingotamento	Lingotamento	Lingotamento
Laminação	Laminadores	Laminadores	Laminadores	Laminadores

Fonte: Adaptado de De Paula (2012). Elaboração própria.

Nota: ¹ A Pelotização não é frequente em usinas integradas a coque, com exceção das siderúrgicas norte-americanas.

NA – não se aplica

As usinas integradas promovem a transformação do minério de ferro em produtos siderúrgicos, semiacabados ou acabados (laminados). Normalmente, esse processo abrange as quatro etapas do processo produtivo. A etapa de preparação da carga visa beneficiar os insumos

- carvão e minério de ferro - que serão utilizados na etapa seguinte, objetivando um melhor desempenho operacional dos altos-fornos. Os equipamentos utilizados nessa etapa são coqueria, sinterização e pelotização. Ressalta-se que para as usinas integradas a coque, a coqueria frequentemente é uma instalação obrigatória¹⁷.

A coqueria compõe-se de uma série de baterias de fornos onde o carvão mineral é aquecido na ausência de ar, separando a matéria volátil do resíduo sólido com alta porcentagem de carbono que é o carvão mineral metalúrgico (ou coqueificável), o principal combustível para a redução do minério de ferro nos altos-fornos. Os processos de sinterização e pelotização buscam aglomerar os finos de minério, juntamente com os finos de calcário e areia de sílica, para a produção de pelotas e sinter¹⁸. Via de regra, a sinterização costuma ser realizada pelas próprias siderúrgicas, ao passo que a pelotização é geralmente operada pelas mineradoras (DE PAULA, 1996; 2012).

Na etapa de redução, o alto-forno é responsável por transformar o minério de ferro em ferro-gusa. Os altos-fornos são revestidos internamente com materiais refratários e podem utilizar dois tipos de redutor: carvão mineral (coque) ou carvão vegetal. As matérias primas – minério de ferro, coque, sinter e fundentes – são adicionadas, através de correias transportadoras, pela parte superior do alto-forno (topo). A seguir, é soprado ar quente através das ventaneiras na parte inferior do equipamento, o que resulta na combustão do coque e a transformação do minério em ferro-gusa. Em seguida o material é vazado nos carros torpedos, vagões especiais, que transportam o ferro fundido até a aciaria.

Antes de ser direcionado para a próxima etapa, o ferro-gusa passa por um pré-tratamento denominado dessulfuração. Sua finalidade é reduzir o teor de enxofre do metal líquido aos níveis desejados para a qualidade do aço a ser produzido. Esse ajuste pode ser realizado por meio de adição de agentes dessulfurantes – nitrogênio, carbetos de cálcio em pó, óxido de cálcio e magnésio, ou misturas destes - na panela de gusa ou da sua injeção profunda por imersão de lança refratária em carro torpedos ou panelas. Outros tratamentos também são aplicados ao gusa, a depender das especificações do aço a ser fabricado, como a dissiliação e desfosforação,

¹⁷ A siderúrgica ArcelorMittal Monlevade é uma exceção, pois trata-se de uma usina integrada a coque, mas não possui coqueria.

¹⁸ Os produtos de minerais de ferro podem ser classificados, segundo sua granulometria, em fino para sinterização (*sinter feed*, finos de 0,15 a 8mm), fino para pelotização (*pellet feed*, abaixo de 0,15mm) e granulado (*lump*, entre 6,3mm e 31,7mm). Este último pode ser utilizado diretamente no alto-forno, não requerendo tratamento prévio. Entretanto, esse tipo de minério é cada vez mais escasso, de modo que a utilização de sinter e pelotas (*pellets*) foi aumentando na siderurgia mundial ao longo do tempo (DE PAULA, 1996). Daí, a origem do amplo mercado internacional de pelotas de ferro.

empregados para remoção do silício e do fósforo, respectivamente, propiciando melhores condições de refino nos conversores LD.

Nas usinas integradas a carvão vegetal, à semelhança das integradas a coque, utilizam-se altos-fornos. Entretanto, estes diferenciam-se em três aspectos: são menores que os altos-fornos a coque; o tempo de campanha (reformas) é mais curto; e dispensa a operação de dessulfuração. Além disso, esse tipo de usina, naturalmente, não requer a instalação de coqueria, e a produção de sinter ou a aquisição de pelotas são realizadas em menor escala, quando comparado com as usinas integradas a coque. No caso das usinas integradas à redução direta, as unidades de redução direta cumprem a função de substituir a etapa de preparação das cargas (coqueria, sinterização e pelletização), assim como os altos-fornos. Nesse tipo de usina, ao invés de produzir ferro-gusa, fabrica-se ferro diretamente reduzido (DRI) ou ferro briquetado a quente (HBI) (DE PAULA, 1996).

A redução direta é um processo amplamente difundido na Índia e no Oriente Médio, em função da boa disponibilidade de gás natural. Em 2017, 70,7% da produção mundial de ferro diretamente reduzido foram provenientes desses países. A Índia e o Irã foram responsáveis, respectivamente, por 33,3% e 21,9% da produção mundial. Cabe destacar que nesse ano, a produção mundial conjunta de DRI-HBI foi de 88,7 milhões de toneladas, ao passo que a de ferro-gusa atingiu 1,180 bilhão.

A etapa de refino consiste da aciaria e do lingotamento. Cabe mencionar que, no caso das usinas semi-integradas, o processo se inicia nessa etapa, tratando-se, portanto, de um processo mais compacto, razão pela qual elas são usualmente chamadas de *mini-mills*. No padrão tecnológico vigente, o refino do aço é realizado em conversor básico a oxigênio (BOF) ou aciaria elétrica (EAF).

Na aciaria básica a oxigênio o ferro-gusa sofre um processo de modificação de composição química, objetivando reduzir o teor de carbono, através da injeção de oxigênio e adição de ferro-ligas, transformando-se em aço. O principal objetivo desse processo é realizar o ajuste da quantidade de carbono ou elementos de ligas, a fim de obter as propriedades desejadas e a redução de fósforo, enxofre e nitrogênio para os níveis aceitáveis. Adicionalmente, alguns aços ao carbono e os aços especiais passam por uma etapa adicional denominada refino secundário ou metalurgia de panela. Entretanto, destaca-se que os aços especiais utilizam mais intensamente este recurso.

Ademais, uma variedade de equipamentos pode ser incorporada nesta etapa, dentre eles: a) forno-panela; b) processos de desgaseificação a vácuo DH, RH e RH-OB; c) instalações

VD/VOD e AOD; d) processos de injeção de fio de alumínio. Eventualmente, cada um desses processos cumpre uma tarefa metalúrgica: descarburização, desgaseificação, adição de ligas, ajuste de composição e de temperatura.

No processo semi-integrado, a sucata, depois de processada, é adicionada em grandes quantidades ao forno elétrico de fusão ao arco (EAF) para ser utilizada como matéria-prima no processo de fusão e refino do aço. Além disso, é possível substituir parcialmente a sucata por ferro-espoja ou ferro-gusa. Cabe destacar que, ao utilizar o forno panela, é possível transferir as operações de refino para fora do forno elétrico, liberando, assim, este equipamento para fusão de uma nova corrida.

Apesar da crescente difusão das aciarias elétricas a partir da década 1970, sua participação na produção mundial retraiu-se nos últimos anos. Segundo De Paula (1998), as aciarias elétricas representavam 32,8% da produção mundial em 1996. Já em 2017, sua participação regrediu para 27,9%. Percebe-se também uma importante diferença entre os maiores produtores de aço do mundo quanto à difusão desta tecnologia. Em países como Índia, Estados Unidos, Turquia e Itália, as aciarias elétricas correspondem a mais de 55% da produção, enquanto na Coreia do Sul, Rússia, Alemanha e Japão, elas respondem por 32,9%, 30,8%, 30,0% e 24,2% respectivamente.

Destaque-se que na China, maior produtor mundial, apenas 9,3% da produção é obtida a partir dessa tecnologia. No Brasil, 21,0% da produção é proveniente de aciarias elétricas, bem abaixo da média mundial (27,9%) (Tabela 3).

Tabela 3 - Distribuição da produção por tipo de aciaria, segundo os maiores produtores mundiais de aço bruto, 2017

Países	Produção 2017 (milhões de toneladas)	Tipo de Aciaria			
		Oxigênio (%)	Elétrica (%)	Siemens-Martins (%)	Outros (%)
China	831,7	90,7*	9,3*	-	0,0*
Japão	104,7	75,8	24,2	-	-
Índia	101,4	44,2	55,8	-	-
Estados Unidos	81,6	31,6	68,4	-	-
Rússia	71,3	66,9*	30,8*	2,4*	-
Coreia do Sul	71,0	67,1	32,9	-	-
Alemanha	43,4	70,0	30,0	-	-
Turquia	37,5	30,8	69,2	-	-
Brasil	34,4	77,6	21,0	-	1,4
Itália	24,1	19,7	80,3	-	-
Mundo	1.689,4	71,6	27,9	0,4	0,1

Fonte: *World Steel Association* (WSA). Elaboração própria.

Nota: (*) dados estimados

A partir desta etapa, o aço já possui sua composição química definida e, portanto, é destinado para a fase de resfriamento (lingotamento). No lingotamento contínuo, processo amplamente difundido, o aço líquido é vazado continuamente em um molde, produzindo, assim, os produtos semiacabados (placas ou blocos e tarugos). Ressalta-se que, em algumas usinas, ainda se utiliza o lingotamento convencional, onde o aço é vazado em lingoteiras e, posteriormente, aquecido em fornos de reaquecimento e encaminhado à operação de desbaste. Nas aciarias equipadas com lingotamento contínuo, o produto segue diretamente para a laminação.

Na etapa de laminação, o aço é submetido a tratamentos físicos e químicos para que possa adquirir forma e propriedades específicas de acordo com cada aplicação. Uma variedade de equipamentos é utilizada nesta etapa, de acordo com o produto a ser fabricado. Nas usinas produtoras de planos comuns, por exemplo, os aços passam por diversas etapas até sua conformação final, tais como: laminação a quente (laminação de chapas grossas ou laminação de tiras a quente), laminação a frio, zincagem, estanhagem e cromagem. Em contrapartida, nas usinas produtoras de longos comuns são destinados a: fornos de reaquecimento, operação de desbaste, laminadores intermediários, laminadores acabadores, tratamentos térmicos e acabamento superficial.

Segundo De Paula (1988, p. 21), a heterogeneidade tecnológica das empresas siderúrgicas, no que se refere à etapa de laminação, dificulta a padronização de indicadores tecnológicos. Um dos indicadores frequentemente utilizados como indicador do grau de atualização tecnológica, por exemplo, é a velocidade máxima de saída na fabricação de fio-máquina.

De modo geral, buscou-se apresentar o processo produtivo da indústria siderúrgica, seus principais produtos e as rotas tecnológicas existentes. Em relação ao processo produtivo, constatou-se que este varia conforme o aço a ser produzido, sendo mais complexo nos casos dos produtos especiais/ligados. No que diz respeito aos produtos siderúrgicos, os planos comuns geralmente tendem a ser fabricados em usinas integradas a coque, embora as usinas semi-integradas atuem nesse segmento também, mas em menor relevância. Já estas são dominantes no segmento de laminados longos. Por fim, no que concerne às rotas tecnológicas existentes, duas são predominantes: usinas integradas a coque e usinas semi-integradas. Já as usinas integradas à redução têm sua disseminação restrita a alguns países, dada a disponibilidade de matéria prima.

2.2. O cenário internacional

A siderurgia é uma atividade amplamente difundida no mundo, em que 92 países produziram 1,69 bilhão de toneladas de aço bruto em 2017 e uma demanda mundial da ordem de 1,60 bilhão, representando um crescimento de 3,9% e 5,3%, respectivamente, em relação ao ano anterior (WSA, 2018a). Contudo, as estatísticas setoriais mostram que desde o início do século XXI, a siderurgia mundial tem vivido períodos de instabilidade. O aumento da demanda de aço observado no período de 2000 a 2007 (crescimento médio de 7,1% a.a) foi responsável por um conjunto de investimentos em projetos *greenfield*¹⁹ que entraram em operação nos anos recentes, notadamente marcados pela desaceleração da demanda chinesa e mundial. Esta trajetória foi drasticamente afetada pela crise financeira de 2007-2008. A demanda global de aço registrou uma tímida expansão de 0,34% em 2008 e uma aguda retração de 6,4% em 2009.

Diante do novo cenário mundial, marcado pelas reversões de expectativas quanto ao crescimento do PIB global em 2008-2009, muitos governos – inclusive o brasileiro – adotaram políticas anticíclicas. Isto proporcionou uma ampliação do mercado mundial siderúrgico de 14% em 2010, mas tal tendência não se mostrou sustentável.

A bem da verdade, no período de 2010-2014, constatou-se um padrão muito instável do crescimento da demanda mundial por aço, marcado por períodos favoráveis (2011 e 2013) e desfavoráveis (2012 e 2014). Os anos de 2015 e 2016 são particularmente marcados por uma mudança de cenário previsto de desaceleração mundial gradual para uma retração mais expressiva da demanda e produção de aço, registrando uma queda de 2,9% em 2015, sendo sucedido por um baixo desempenho de 1% em 2016. Como consequência, o consumo mundial aumentou a um ritmo anual médio de 2,7% no período de 2008-2017, aquém do resultado de 7,1% apresentado no período anterior (2000-2007).

Segundo Basson (2017), a estimativa de crescimento da demanda, prevista pela *World Steel Association (WSA)*, é de 1,3% a.a para o período de 2016-2020 e 2020-2025 e de 1,0% a.a nos anos de 2025-2035. Portanto, o consumo mundial de produtos siderúrgicos deve alcançar 1,6 bilhão de toneladas em 2020, 1,7 bilhão de toneladas em 2025 e 1,9 bilhão de toneladas em 2035, ou seja, a ampliação da demanda mundial será modesta nos próximos 18 anos.

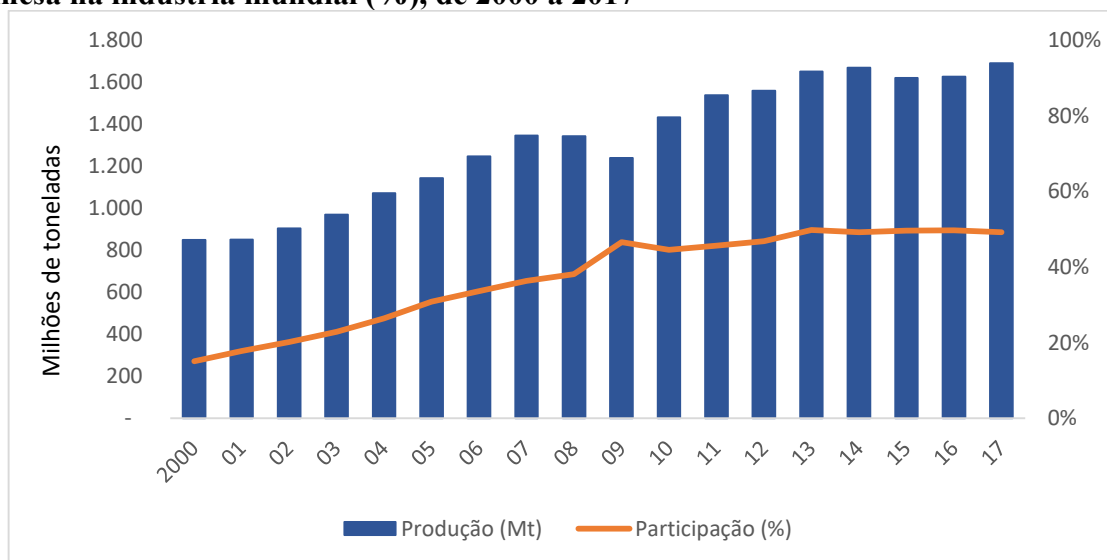
¹⁹ O termo *greenfield* é utilizado para caracterizar os investimentos iniciados do zero, ou seja, não foram sequer montados e estão em fase de planejamento. Além da construção de novas instalações de produção, estes projetos podem também incluir a construção de novos centros de distribuição, escritórios, alojamentos, bem como o treinamento de funcionários segundo o padrão da nova empresa. Portanto, são projetos que não contam com estrutura física prévia.

Além disso, deve-se ressaltar que o nível de utilização da capacidade instalada (NUCI) da siderurgia mundial, em 2016, foi de 69%. De acordo com as estimativas da WSA, um consumo de 1,9 bilhão de toneladas em 2035 equivale a uma demanda de 2,06 bilhões de toneladas de aço bruto. Considerando que a capacidade instalada atual totaliza 2,39 bilhões de toneladas de aço bruto, a estrutura atual não precisaria ser aumentada nos próximos 18 anos para abastecer a demanda global por produtos siderúrgicos (BASSON, 2017).

A China é o maior produtor e consumidor de aço do mundo. A participação chinesa na demanda mundial de produtos siderúrgicos passou de 16,3% em 2000 para 34,2% em 2007, resultado do forte aumento da demanda de aço observado no período de 2000 a 2007 por esse país (crescimento médio de 16,6% a.a). No período de 2008-2017 a demanda chinesa cresceu em média 5,8% a.a, aumentando sua participação de 36,4% em 2008 para 46,1% em 2017.

No que tange à produção chinesa, essa cresceu em média 18,7% a.a no período de 2000-2007, aumentando sua participação na produção de aço bruto de 15,1% em 2000 para 36,4% em 2007. No período de 2008-2017, sua produção cresceu 5,4% a.a, tendo sua participação aumentada de 38,1% em 2008 para 49,2% em 2017. Vale também destacar que a partir de 2013 a participação relativa desse país tem girado em torno 50% da produção mundial (Gráfico 3). Este vigoroso aumento da produção siderúrgica chinesa foi estimulado, entre outros fatores, por elevadas taxas de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) e da Formação Bruta de Capital Fixo (FBKF), bem como pelo intenso processo de urbanização da população chinesa.

Gráfico 3 – Produção mundial de aço bruto (milhões de toneladas) e participação chinesa na indústria mundial (%), de 2000 a 2017



Fonte: Word Steel Association (WSA). Elaboração própria.

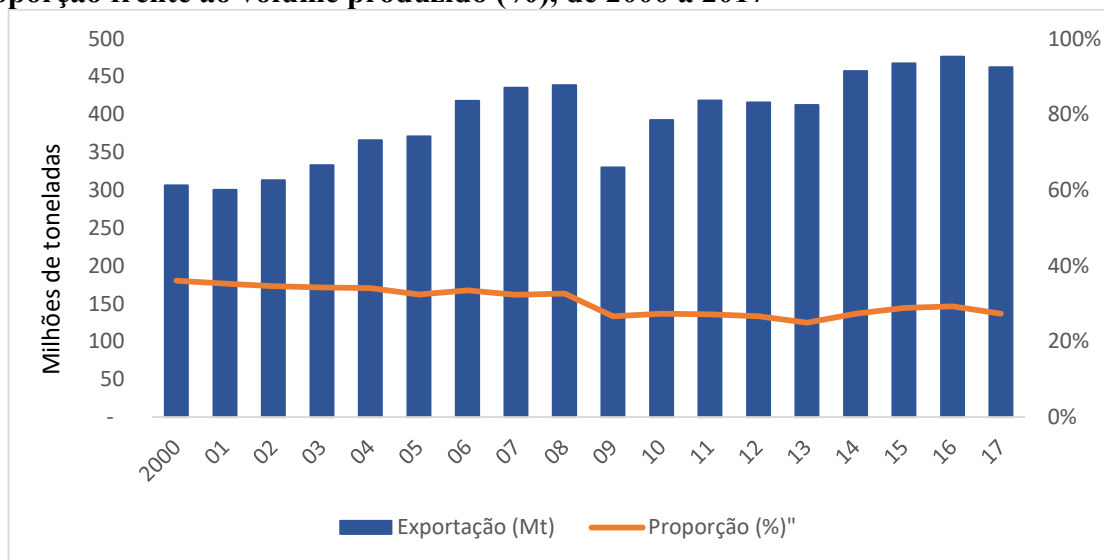
Ainda em relação ao deslocamento geográfico da produção, embora o aumento da participação chinesa tenha sido a questão mais relevante, cabe também destacar a retração verificada nos países desenvolvidos, tais como Japão (passando de 12,5% em 2000 para 6,2% em 2017), União Europeia-28 (22,8% para 10%, respectivamente) e América do Norte (15,9% para 6,8%), e a mudança do polo dinâmico da indústria do aço, que atualmente se encontra na Ásia, com destaque para Índia e países-membros da Associação de Nações do Sudeste Asiático (Asean), em especial o Vietnã. Em 2017, a participação dos outros países asiáticos – exceto China – na produção siderúrgica mundial atingiu 19,7%. Ressalta-se ainda, que a participação da América Latina regrediu de 4,6% para 2,6%, ao longo do período analisado.

No que diz respeito ao processo de deslocamento geográfico do consumo de produtos siderúrgicos, destaca-se a significativa redução da participação relativa dos países desenvolvidos, em particular a América do Norte (de 20,3% para 9,1%, respectivamente) e União Europeia-28 (de 22,1% para 10,3%). A América Latina também teve sua importância relativa reduzida, de 3,4% para 2,3% no período apurado.

A evolução do comércio internacional de produtos siderúrgicos pode ser verificada a partir do Gráfico 4. O volume de exportações aumentou de 307 milhões de toneladas em 2000 para 439 milhões de toneladas em 2008. Após a retração no biênio 2009-2010, observou-se uma recuperação parcial até atingir 463 milhões de toneladas em 2017.

Embora, o crescimento das exportações de produtos siderúrgicos, em termos absolutos, tenha sido considerável, em termos relativos, o desempenho pode ser considerado insatisfatório. Isso pode ser verificado pela retração da fatia dos produtos siderúrgicos comercializados internacionalmente, que passou de 36% em 2000 para 27% em 2017. A expansão da siderurgia chinesa é novamente o principal fator explicativo desta situação, pois seu coeficiente de abertura ao comércio internacional é relativamente baixo (DE PAULA, 2012).

Gráfico 4 - Exportação mundial de produtos siderúrgicos (milhões de toneladas) e proporção frente ao volume produzido (%), de 2000 a 2017



Fonte: *World Steel Association (WSA)*. Elaboração própria.

Contudo, a ampliação da importância relativa dos laminados longos na produção siderúrgica global não acarretou grandes mudanças na composição das exportações siderúrgicas. No período de 2000-2017, a fatia das exportações de laminados planos ficou praticamente constante no patamar de 50%. A participação dos laminados longos, no qual as empresas usualmente possuem um mercado de atuação menor do que os laminados planos, até em função da rota predominante utilizada (usinas semi-integradas), também apresentou o mesmo comportamento no período analisado, ao redor de 25%. Para produtos tubulares e semiacabados (placas, blocos e tarugos), também não se constata alterações substanciais, mantendo-se no nível de 9% e 16%, respectivamente.

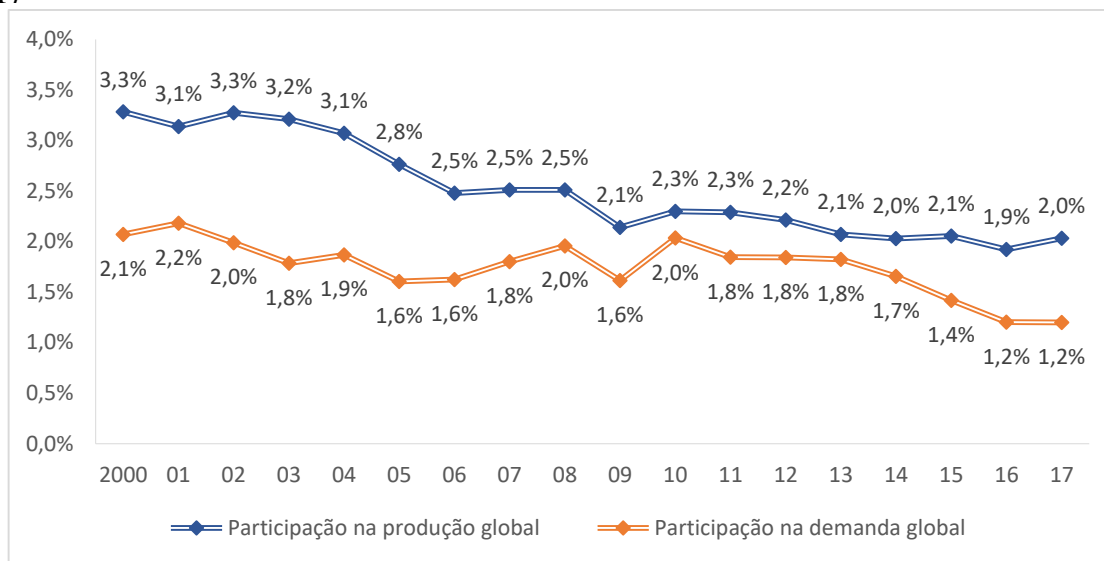
2.3. O cenário da siderurgia brasileira

A siderurgia é uma atividade bem consolidada no Brasil, porém o desempenho produtivo nos últimos anos tem sido aquém das expectativas. A produção brasileira de aço bruto cresceu em média 3,84% a.a no período de 2000 a 2007, resultando em uma expansão de 27,9 milhões de toneladas em 2000 para 33,8 milhões de toneladas em 2007. Em 2017, segundo os dados da WSA (2018a), tal produção passou para 34,4 milhões de toneladas, implicando em uma tímida expansão de 0,17% a.a no período de 2008 a 2017. A queda da produção é ainda mais significativa ao considerar a implementação e maturação de grandes projetos, a saber as usinas Companhia Siderúrgica do Atlântico (CSA) e Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP),

que entraram em operação a partir de 2008. Diante desse cenário, a participação brasileira na produção mundial regrediu de 3,3% em 2000 para 2,0% em 2017.

Já o consumo de produtos siderúrgicos no Brasil apresentou um ritmo de redução de 1,4% a.a no período de 2008 a 2017, enquanto o consumo mundial aumentou a uma taxa média de 2,41%. Logo, a participação brasileira na demanda mundial de produtos siderúrgicos diminuiu de 2,1% em 2000 para 1,2% em 2017, como pode ser observado no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Participação brasileira na produção e demanda global de aço, de 2000 a 2017



Fonte: *World Steel Association (WSA)*. Elaboração própria.

A indústria siderúrgica possui grande importância na indústria de transformação, na participação no PIB e na geração de emprego. Com relação à participação da cadeia produtiva de aço no produto interno bruto (PIB), os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) referentes ao período de 2006-2014 mostram uma estagnação contínua da participação do valor adicionado do setor siderúrgico no PIB a partir de 2009, segundo dados da Tabela 4.

Tabela 4 – Evolução do valor adicionado da indústria siderúrgica brasileira, de 2006 a 2014

Componentes do valor adicionado	Valor adicionado bruto (valores correntes em bilhões R\$)								
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Indústria de Transformação	339,9	385,0	434,0	436,4	494,4	515,7	514,0	558,7	597,4
Metalurgia ¹	22,8	28,3	37,8	19,9	24,2	28,7	30,2	34,1	40,5
Siderurgia ²	15,9	21,2	31,6	15,0	16,9	20,7	23,5	24,8	30,2
Brasil	2.049,3	2.319,5	2.626,5	2.849,8	3.302,8	3.720,5	4.094,3	4.553,8	4.972,7
Siderurgia (% da Metalurgia)	69,9%	74,9%	83,6%	75,3%	70,0%	72,1%	78,0%	73,0%	74,6%
Siderurgia (% da Ind. de Transf.)	4,7%	5,5%	7,3%	3,4%	3,4%	4,0%	4,6%	4,4%	5,1%
Siderurgia (% do Brasil)	0,8%	0,9%	1,2%	0,5%	0,5%	0,6%	0,6%	0,5%	0,6%

Fonte: IBGE e NEREUS. Elaboração própria.

Notas: ¹Dados referente a divisão 24 da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE 2.0);

²Dados referente ao grupo 2491 (Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura) da CNAE 2.0.

Em função do cenário econômico interno e também do cenário externo, a participação do setor siderúrgico no valor adicionado da indústria de transformação tem apresentado certa volatilidade nos últimos anos. Entretanto, analisando os dados da Tabela 4, observa-se a importância da cadeia produtiva do aço para o setor de metalurgia, no qual responde em média por 74,5% do produto agregado do setor.

A indústria siderúrgica é intensiva em capital e, portanto, gera uma quantidade de empregos relativamente menor do que outros setores da indústria de transformação, notadamente os mais intensivos em mão de obra. Como observado na Tabela 5, a cadeia produtiva de aço tem um importante papel na geração de emprego no setor metalúrgico. Sua participação tem apresentado uma trajetória de crescimento, apesar da redução no número de vínculos empregatícios na cadeia de produção de aço, aumentando de 32,4% em 2007 para 39% em 2016.

Tabela 5 – Evolução do emprego na indústria siderúrgica, de 2007 a 2016

Emprego Formal (em milhares de unidades)	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Indústria de Transformação	7.082	7.311	7.361	7.886	8.114	8.148	8.293	8.171	7.567	7.148
Metalurgia	249	254	230	254	260	252	251	237	214	199
Siderurgia	81	85	80	88	90	90	89	87	84	78
Brasil	37.607	39.442	41.208	44.068	46.311	47.459	48.948	49.572	48.061	46.060
Siderurgia (% da Metalurgia)	32,4%	33,3%	34,8%	34,6%	34,7%	35,6%	35,4%	36,5%	39,4%	39,0%
Siderurgia (% da Ind. de Transf.)	1,1%	1,2%	1,1%	1,1%	1,1%	1,1%	1,1%	1,1%	1,1%	1,1%
Siderurgia (% do Brasil)	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%

Fonte: MTE/RAIS. Elaboração própria.

Apesar da baixa capacidade de geração de emprego no setor, quando comparado com outros setores da indústria de transformação, os efeitos indiretos e induzidos da indústria siderúrgica são relevantes. Segundo o estudo “Importância Estratégica do Aço na Economia Brasileira” da Fundação Getúlio Vargas (FGV) de 2011, para cada emprego direto gerado no setor outros 23,57 empregos são criados nos demais setores da economia (IABr, 2011). Logo, considerando os impactos indiretos e induzidos, a indústria do aço contribuiu para a geração de cerca de 1,8 milhão de empregos no ano de 2016, número que reforça sua importância socioeconômica.

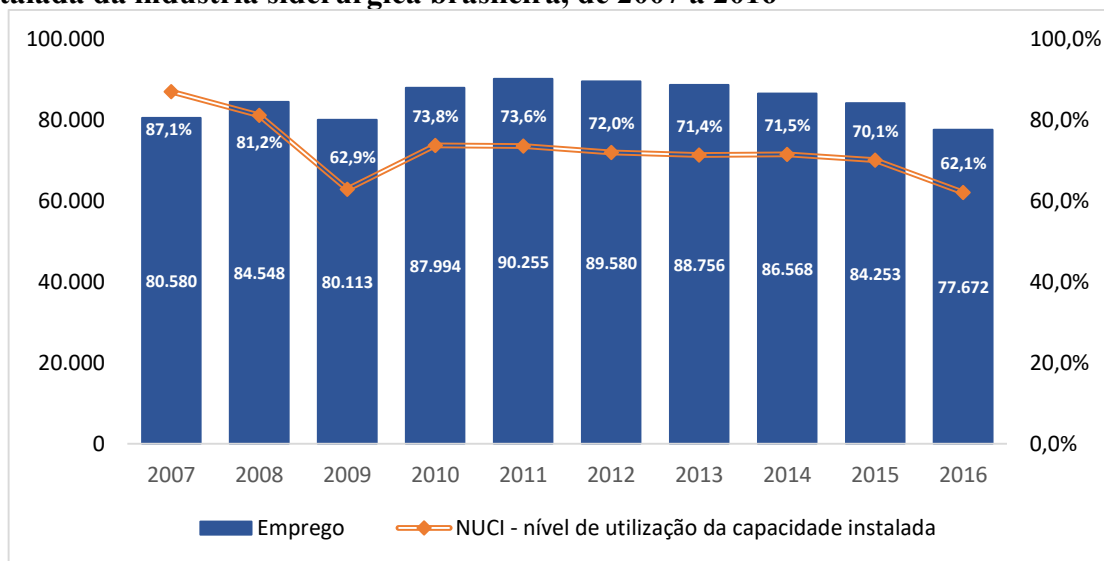
Esse cenário, de redução da participação brasileira na produção e demanda mundial de aço, é ainda mais preocupante quando consideramos o aumento da capacidade instalada do parque siderúrgico brasileiro. No período de 2000 a 2007, a capacidade instalada ampliou-se a um ritmo anual de 3,75%, enquanto a produção aumentou a uma taxa média de 3,84%. Como consequência, o nível de utilização da capacidade instalada (NUCI) apresentou taxas elevadas, em média 89%, atingindo os maiores patamares em 2000 (93,3%) e 2004 (96,8%). Esse período foi marcado por baixas taxas de ociosidade e considerável incentivo aos investimentos com vistas à ampliação da capacidade. No período de 2005-2007, a ociosidade média foi de 15%, exatamente o mesmo nível apresentado pela experiência internacional.

Como resultado da crise econômico-financeira mundial, o NUCI da indústria brasileira de aço reduziu-se para 62,9% em 2009. Em função do pacote de estímulo macroeconômico, via consumo doméstico, adotado pelo governo brasileiro em 2010, ele aumentou para 73,8%.

Entretanto, no período de 2008 a 2016, a capacidade instalada expandiu em média 2,95% a.a., enquanto a produção amargou uma retração anual de 0,9%, resultando em uma taxa média de utilização da capacidade instalada de 71%.

Embora o NUCI da indústria siderúrgica tenha apresentado uma expressiva queda nos últimos anos, o comportamento do número de empregos no setor não apresentou esta mesma trajetória, conforme pode ser observado no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Desempenho recente do número de empregos e utilização da capacidade instalada da indústria siderúrgica brasileira, de 2007 a 2016



Fonte: MTE/RAIS e IABr. Elaboração própria.

Em 2016, o NUCI atingiu o patamar de 62,1%, correspondendo a uma queda de 19,1 pontos percentuais comparativamente a 2008, evidenciando uma retração muito mais acentuada do que a verificada pela siderurgia mundial, que foi de 11,4 pontos percentuais. Portanto, pode-se concluir que esse cenário de redução da produção e ampliação da capacidade produtiva são fatores substanciais para o desestímulo aos investimentos no setor (MELLO LOPES, 2017).

Quanto às expectativas de crescimento, o CREDIT SUISSE (2018) projeta que a produção brasileira de aço bruto será equivalente a 36 milhões de toneladas em 2019 e a 37,6 milhões em 2020, representando, portanto, um nível de utilização da capacidade instalada de 82,3% e 85,2%, respectivamente. A *World Steel Association* (WSA, 2018c) apresenta estimativa muito similar, considerando que a produção brasileira de aço bruto atingirá 35,5 milhões de toneladas em 2019 e a 36,8 milhões de toneladas em 2020. De acordo com a última previsão da WSA, divulgado em outubro de 2018, o consumo brasileiro de produtos siderúrgicos aumentará 3,2% em 2019 e 3,9% em 2020.

Em termos de produtos e segmentos de mercado, a siderurgia brasileira não apresenta peculiaridades relevantes em relação à siderurgia mundial. A estrutura é considerada bastante completa, de modo que o único tipo relevante de produto siderúrgico não fabricado no país é trilho. Segundo De Paula (2012), tal produto deixou de ser fabricado pela CSN em 1996.

Em termos de distribuição geográfica da produção, em 2017, a região Sudeste foi responsável por 88,5% do total, seguida pela região Nordeste (8,2%), Sul (2,2%) e Norte (1,1%). Destaque-se que a região Centro-Oeste não possui nenhuma usina siderúrgica, embora segundo De Paula (2017), exista uma relaminadora de laminados longos.

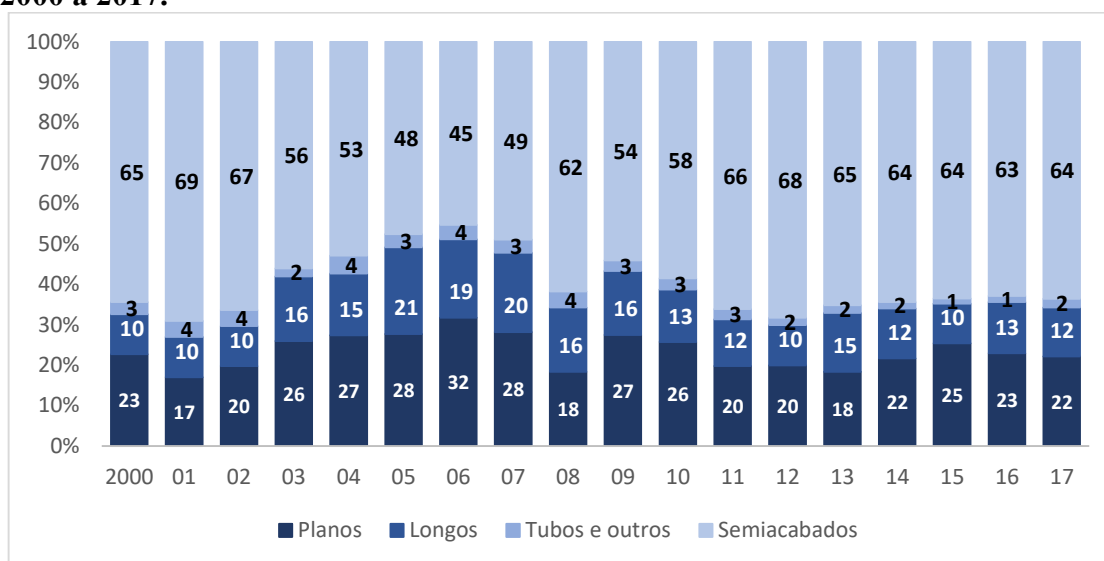
A região Sudeste (com participação de 60,3%) também liderou a distribuição geográfica do consumo aparente de produtos siderúrgicos no Brasil em 2017, seguida pela região Sul (22,3%), Nordeste (10,8%), Centro-Oeste (3,9%) e Norte (2,7%), segundo IABr (2018b). Em relação aos produtos, em 2017, 61% do consumo aparente foram relativos aos laminados planos, enquanto os laminados longos representaram 39%. Estes dados mostram que o perfil de consumo brasileiro está bem próximo ao de países desenvolvidos.

À semelhança da experiência internacional, a construção civil foi o maior consumidor de produtos siderúrgicos no Brasil em 2017, embora a participação relativa deste setor (38,3%) seja inferior à média mundial (51%) e se distancia dos padrões típicos de países emergentes (55% na China, por exemplo). Os produtores de equipamentos mecânicos responderam por 24,3% da demanda brasileira em 2017, superando a indústria automotiva (20,4%), produtos de metal (9,6), equipamentos elétricos (2,9%), aplicações domésticas (2,3%) e outros transportes (2,1), de acordo com a WSA (2018a).

Cabe destacar que a siderurgia brasileira possui duas peculiaridades produtivas relevantes. Primeiro, o Brasil é o único país que utiliza altos-fornos a carvão vegetal com produção expressiva. De Paula (2017), destaca que fora do Brasil há apenas duas plantas que possuem este tipo de equipamento, as siderúrgicas Aceros Zapla (Argentina) e Acepar (Paraguai). Em 2017, o Brasil foi responsável por 99% da produção mundial de ferro-gusa à base de carvão vegetal. No mesmo ano, as exportações brasileiras de ferro-gusa alcançaram 2,3 milhões de toneladas.

Segundo, o padrão da composição das exportações brasileiras é bastante distinto do perfil mundial. Os semiacabados possuem uma elevada participação relativa nas exportações globais de produtos siderúrgicos (65%, em tonelagem), enquanto para o mundo, este produto representa somente 14,1%, conforme o Gráfico 7.

Gráfico 7 – Participação dos tipos de produtos siderúrgicos nas exportações brasileiras, de 2000 a 2017.



Fonte: IABr. Elaboração própria.

Em síntese, buscou-se, neste capítulo, apresentar um panorama geral da indústria siderúrgica. Em relação à siderurgia mundial, constatou-se que o crescimento verificado no período de 2000-2007 foi fortemente abalado pela crise financeira de 2007-2008, impactando drasticamente a produção e demanda por produtos siderúrgicos nos anos seguintes. Além da abrupta redução destes indicadores, a siderurgia mundial tem apresentando altas taxas de ociosidade, que não são fruto apenas da retração econômica, mas, também, dos investimentos realizados em capacidade produtiva no período pré-crise. Adicionalmente, as expectativas de crescimento da demanda por produtos siderúrgicos mostram que as empresas não precisarão ampliar sua produção, abrindo, assim, novas oportunidades para melhoria de processos e ganhos de produtividade.

No que tange à siderurgia brasileira, verificou-se que o cenário econômico do setor é ainda mais grave. O aumento da participação chinesa na demanda e produção mundial de produtos siderúrgicos impactou diretamente a participação brasileira no mercado mundial de aço. Ademais, a penetração de produtos chineses no mercado brasileiro tem aumentado, acirrando, assim, a competição no mercado interno. Diante deste cenário, as siderúrgicas brasileiras deverão adotar iniciativas que as tornarem mais competitivas e as tecnologias da Indústria 4.0 podem ser uma alternativa, pois proporcionam ganhos de eficiência operacional e correspondem a investimentos relativamente baixos, quando comparados ao padrão do setor siderúrgico.

CAPÍTULO 3: INDÚSTRIA 4.0 E A SIDERURGIA BRASILEIRA

O objetivo deste capítulo é apresentar os *Clusters* Tecnológicos que dão alicerce à Indústria 4.0, bem como os impactos na cadeia de produção do aço. A primeira seção destina-se à discussão sobre os conceitos relacionados à Indústria 4.0 e apresenta, detalhadamente, as tecnologias investigadas nesta Dissertação. A segunda seção traduz um esforço de reflexão sobre os principais desenvolvimentos e aplicações na siderurgia mundial, destacando o papel dos provedores de tecnologias para siderurgia, bem como a importância das parcerias para a maior difusão das aplicações específicas. A última seção destina-se à investigação empírica sobre os esforços tecnológicos das siderúrgicas brasileiras em relação à difusão das novas tecnologias. A partir dos resultados encontrados, fruto de questionários aplicados, buscou-se identificar as expectativas das empresas do setor em relação aos impactos da Indústria 4.0 na estrutura da siderurgia brasileira.

3.1. Fábricas inteligentes e seus *Clusters* Tecnológicos

O avanço e a difusão do paradigma das tecnologias de informação e comunicação (TIC's) tem criado um mundo cada vez mais conectado e dependente de informação. Com a difusão da Internet tem-se verificado um número cada vez maior de pessoas, dispositivos, objetos e sistemas conectados globalmente, gerando um volume de informações substanciais, que tratadas adequadamente tornam-se extremamente valiosas no ambiente empresarial. Em meio a essa atmosfera de transformações, o tema “Indústria 4.0”²⁰ tem ganhado força, em virtude do comprometimento em unir o mundo físico e o virtual rompendo, assim, as fronteiras do atual modelo de produção.

A Indústria 4.0 faz uso da conectividade – entre pessoas, dispositivos, objetos e sistemas – para formar redes de produção dinâmicas e auto-organizadas. A partir das suas tecnologias chaves é possível criar uma rede inteligente de objetos e um gerenciamento independente de processos, com a interação dos mundos real e virtual representando o elemento imprescindível do processo produtivo. Nesse novo modelo de produção, o processo produtivo passa a ser

²⁰ É importante destacar que o presente termo é tratado na literatura atual sob diferentes denominações, de modo que muitas vezes refletem diretamente os programas governamentais que articulam o desenvolvimento e difusão dessas tecnologias. Dentre as diversas nomenclaturas, pode-se destacar os conceitos alemão (*Industrie 4.0*), norte americano (*Advanced Manufacturing*), chinês (*Intelligent Manufacturing*) e japonês (*E-Factoring*), que por sua vez são os programas tecnológicos de cada país (IEC, 2015). Na presente Dissertação optou-se por utilizar o termo Indústria 4.0. Apesar de não representar um programa formal no caso brasileiro, entende-se que este é termo comumente adotado pelas empresas e outras instituições brasileiras.

descentralizado, o que representa uma mudança de paradigma do modelo de produção vigente – centralizado (IEDI, 2017; 2018a; 2018b).

Isso significa que as máquinas de produção industrial não mais simplesmente processam o produto, mas que o produto se comunica com os equipamentos para determinar exatamente o que fazer. Deste modo, os “produtos inteligentes” são exclusivamente identificáveis, o que possibilita sua rastreabilidade em qualquer etapa do processo produtivo, além de conhecerem seu próprio histórico, *status* atual e rotas alternativas para alcançar seu destino final. Os sistemas de manufatura incorporados são conectados verticalmente com processos de negócios dentro de fábricas e empresas, e estas são conectadas horizontalmente a redes de valor dispersas que podem ser gerenciadas em tempo real. Esse fluxo permite acompanhar a fabricação de um produto desde a colocação do pedido até a logística de entrega (MACDOUGALL, 2014).

É importante ressaltar que, no âmbito da literatura específica sobre Indústria 4.0 e siderurgia, os conceitos de integração vertical e horizontal são distintos daqueles usualmente utilizados na área de conhecimento da economia industrial. Conforme explica Peters *et al.* (2016), a integração vertical é compreendida como a integração de todos os componentes de TI e automação de uma única planta ou instalação, enquanto a integração horizontal diz respeito a integração ao longo da cadeia industrial completa de produtos siderúrgicos.

A produção inteligente apresenta um enorme potencial disruptivo, uma vez que permite combinar a fabricação de produtos em escala, lotes únicos (customização) e lucratividade. Além disso, processos dinâmicos de negócios e engenharia permitem mudanças de última hora na produção e oferecem a capacidade de responder de forma flexível a interrupções e falhas em decorrência dos fornecedores, por exemplo. Ademais, a produção inteligente poderá resultar em novas formas de criação de valor e novos modelos de negócios, proporcionando às empresas a oportunidade de desenvolver e fornecer serviços a jusante.

No entanto, as tecnologias viabilizadoras desse modelo emergente abrangem um extenso espectro e, muitas delas, estão em fase de desenvolvimento ou encontram certa resistência na sua aplicação. Independente do estágio atual, essas tecnologias buscam cumprir um ou mais dos princípios básicos que norteiam o processo produtivo inteligente, conforme detalhado a seguir.

Segundo Hermann *et al.* (2015), no ambiente da produção inteligente esses princípios são descritos, conceitualmente, como:

- i. Interoperabilidade: capacidade de comunicação entre produtos, sistemas de produção e de distribuição, através de redes abertas e descrições semânticas, independentemente da natureza e origem do seu fabricante, viabilizados pela criação de protocolos e padrões internacionais;
- ii. Virtualização: eficácia dos sistemas produtivos de monitorar processos e, a partir de dados gerados por sensores, criar uma versão virtual que reflete o mundo físico por meio de modelos matemáticos;
- iii. Descentralização: competência dos equipamentos de, a partir de etiquetas RFID²¹, gerenciar o processo produtivo sem a intervenção humana, dispensando assim o planejamento e controle central;
- iv. Capacidade de resposta em tempo real: reação dos sistemas, a partir de coleta e análise de dados, em redirecionar a produção para rotas alternativas e eficientes, de modo a adaptar a produção a mudanças de demanda ou problemas de operação;
- v. Orientação ao serviço: disponibilização das funcionalidades de empresas, sistemas e seres humanos sob a forma de serviços (internos e externos) em plataformas *online*, viabilizando assim a operação dos processos específicos do produto com base nos requisitos do cliente (customização) fornecidos pelas etiquetas RFID;
- vi. Modularidade: habilidade dos sistemas se ajustarem e reorganizarem simultaneamente com as mudanças na demanda ou necessidade de customização de produtos, dando flexibilidade à produção no que diz respeito à substituição ou inclusão de etapas no processo produtivo.

Outra característica comum entre essas tecnologias é o caráter multidisciplinar embarcado nos seus desenvolvimentos, já que requerem a interação de diversas áreas científicas e/ou tecnológicas. Além disso, muitas delas dependem do avanço de outras tecnologias. Ressalta-se, ainda, a coexistência entre tecnologias maduras, em fase de seleção ou mutação dentro dos próprios campos tecnológicos. Essas tecnologias foram agrupadas em *Clusters Tecnológicos* com o objetivo de capturar as tecnologias chaves que, quando plenamente

²¹ RFID (*Radio Frequency Identification*) é um método de identificação automática através de sinais de rádio, recuperando e armazenando dados remotamente através de dispositivos denominados etiquetas RFID.

desenvolvidas, serão capazes de sustentar os princípios do novo modelo de produção descentralizada e autônoma em tempo real (IEL, 2017).

Os agrupamentos das tecnologias chaves dão origem a sete *Clusters* Tecnológicos, classificados em: Inteligência Artificial, *Big Data* e Computação em Nuvem; Tecnologia de Redes de Comunicação Rápidas e Seguras; Internet das Coisas e dos Serviços; Produção Inteligente e Conectada; Materiais Avançados; Nanotecnologia; Armazenamento e Coleta de Energia.

O *Cluster* Tecnológico Inteligência Artificial, *Big Data* e Computação em Nuvem combina três trajetórias tecnológicas que, em conjunto, funcionam como um ecossistema. A Inteligência Artificial (AI – *Artificial Intelligence*) pode ser definida como a capacidade de máquinas computadorizadas de realizar tarefas tipicamente associadas a seres dotados de inteligência. Segundo IEL (2017), a AI reúne um conjunto estruturado de conhecimento e tecnologias que buscam replicar o comportamento humano, direcionados a determinados fins: percepção, compreensão, interpretação, otimização, ação e etc. Essas tecnologias estão divididas em quatro ramos: máquinas computadorizadas que replicam o pensamento humano, máquinas computadorizadas que replicam as ações humanas, máquinas computadorizadas que pensam racionalmente e máquinas computadorizadas que agem racionalmente.

O *Big Data* refere-se à tendência das tecnologias de informação e comunicação de processar grandes quantidades de dados de forma a obter as informações adequadas para uma rápida tomada de decisão, ou seja, trata-se do conjunto de técnicas e ferramentas computacionais utilizadas na extração de valor de grandes volumes de dados. Segundo Macdougall (2014), dentro do processo produtivo inteligente o *Big Data* é comumente chamado de seis C's: 1) Conexão (sensores e redes); 2) *Cloud* (computação e sob demanda); 3) *Cyber* (modelo e memória); 4) Conteúdo/Contexto (significado e correlação); 5) Comunidade (compartilhamento e colaboração); 6) Customização (personalização e valor).

A Computação em Nuvem (*Cloud Computing*) remete à transferência de dados e realização de processos computacionais em instalações externas à firma e posterior recuperação dos dados e resultados por meio da Internet. Assim, as tecnologias de *Big Data* e Computação em Nuvem são entendidas como tecnologias instrumentais ao desenvolvimento da Inteligência Artificial, pois quando aplicadas em conjunto resultam em diferentes formas de aprendizagem das máquinas computadorizadas.

Desse modo, o ecossistema formado por essas tecnologias busca cumprir três funções básicas dentro do ambiente da produção inteligente: geração e acumulação de informação,

agregação de informação e análise de informação. Essas soluções permitem que os tempos de tomada de decisão sejam acelerados e que os processos de negócios sejam otimizados. Ademais, a AI pode ser utilizada em sistemas ciberfísicos²² para processar e tomar decisões automatizadas, descentralizadas e autônomas, com aperfeiçoamento progressivo por meio de algoritmos de *deep learning* e *machine learning* (IEL, 2017).

Assim, a capacidade das máquinas aprenderem e adquirirem funções preditivas, por meio de processos que emulam redes neurais, é um dos fatores promissores do modelo de produção emergente. A complexidade desse ecossistema acarreta mudanças substanciais no segmento de Computação em Nuvem, que passa a ser cada vez mais complexo e diversificado, exigindo nuvens cada vez mais heterogêneas (abertas, híbridas, proprietárias compartilhadas, corporativas, etc.), suportadas por potentes servidores. Dentre as tecnologias chaves desse *cluster* encontram-se: servidores e computadores de alta *performance* e *softwares* (DE PAULA, 2017).

O *Cluster* Tecnológico Redes de Comunicação Rápidas e Seguras pode também ser compreendido como um ecossistema, uma vez que é formado por sistemas de computadores, canais de distribuição e recursos relacionados e interligados para troca de informações. Conceitualmente a rede de comunicação é representada por um modelo de camadas, cujo objetivo é separar as diferentes funções envolvidas no tráfego das informações. Esse modelo permite visualizar a distinção entre a rede física e a rede lógica de comunicação.

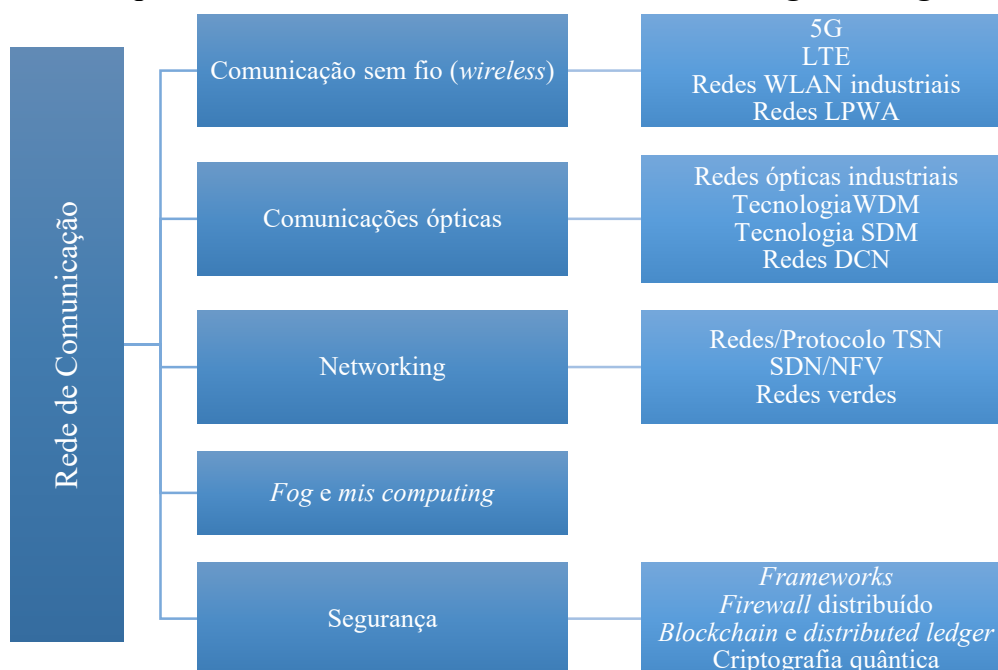
De acordo com IEL (2017), a rede física corresponde ao meio físico de transmissão e as funções e procedimentos necessários para estabelecer conexões entre os nós das redes, bem como recursos elétricos, mecânicos, funcionais e procedurais para ativar e desativar conexões físicas na transmissão de *bits*²³. Por sua vez, a rede lógica é constituída pelos recursos necessários à transferência de dados entre as partes (nós da rede), otimizando o serviço da rede disponível quanto ao desempenho requerido pelas sessões e provendo os meios para estabelecer, manter e encerrar as conexões entre os nós.

Uma rede de comunicação requer um conjunto de tecnologias, tais como: Tecnologias de comunicação sem fio (*Wireless*); Tecnologias de fibras óticas; Tecnologias de *networking*; *Fog* e *Mis Computing*; *Blockchain* e *Distributed Ledger*; Criptografia Quântica (Figura 2).

²² Sistemas ciberfísicos (CPS) são tecnologias habilitadoras que unem os mundos físico e virtual, criando assim, um mundo verdadeiramente conectado em rede, no qual objetos inteligentes se comunicam e interagem entre si. Esses equipamentos são dotados de sensores que permitem capturar informações sobre a realidade, transformá-las em dados e utilizá-los na tomada de decisão e atuação de forma automatizada (MACDOUGALL, 2014).

²³ *Bit*, que significa dígito binário em português, é a menor unidade de informação que pode ser armazenada na comunicação de dados.

Figura 2 – Esquema de uma rede de comunicação e as tecnologias emergentes



Fonte: IEL. Elaboração própria.

As tecnologias de comunicação sem fio e fibras ópticas são instrumentais para a Rede física, por outro lado as tecnologias de *networking* são instrumentais para a Rede lógica. A rede lógica ainda inclui a utilização de protocolos²⁴, que é o conjunto de regras que governam a comunicação entre as partes. *Fog e Mis Computing* está relacionada ao processamento de informações próximo à borda da rede e aos dispositivos acoplados a sensores. Por fim, *Blockchain e Distributed Ledger* e Criptografia Quântica remete à segurança na transmissão dos dados (IEL, 2017).

O volume de informação a ser transportada e sua criticidade, resultantes do novo modelo de produção e do processo de digitalização ubíqua em geral, requer novas exigências das redes de comunicação, não só em termos de amplitude, velocidade e cobertura de banda, como também de segurança, como por exemplo, ataques cibernéticos e integridade física dos sistemas/equipamentos de rede. IEDI (2018b) afirma que a natureza detalhada e complexa das informações criadas por objetos inteligentes exige soluções capazes de abordar questões de interação e flexibilidade, sem mencionar questões de segurança e privacidade dos dados.

²⁴ No ambiente de produção inteligente, destacam-se três importantes tecnologias dentro do escopo da Tecnologia de *networking*: Protocolos TSN (*Time Sensitive Networking*), que são responsáveis por assegurar o comportamento da rede em tempo real; Protocolos SDN (*Software Defined Networking*), que permitem a separação entre *hardware* e *software*; Tecnologia NFV (*Network Function Virtualization*), que permite desacoplar o equipamento físico na rede das funções executadas por ele, tornando possível a produção flexível e conectada (IEL, 2017).

Cabe ressaltar que as tecnologias de redes de comunicação são habilitadoras para a chamada servitização, ou seja, para a combinação de serviços com produtos nas ofertas das firmas, portanto, está diretamente relacionada ao princípio orientação ao serviço. As tecnologias desse *Cluster* concentram-se em dois campos fundamentais: tecnologias óticas (fibras, equipamentos e componentes dedicados) e novos materiais.

O *Cluster* Internet das Coisas (IoT) e dos Serviços²⁵ (IoS) compreende as tecnologias de sistemas, equipamentos e componentes que dão origem aos termos. A IoT pode ser definida como um sistema de interconexão, através da Internet ou de uma rede específica, de dispositivos digitais incorporados em objetos cotidianos, permitindo-lhes enviar e receber dados, e atuar sobre esses objetos. Por sua vez, a IoS é o meio digital por onde empresas, pessoas ou sistemas inteligentes podem se comunicar com o objetivo de disponibilizar e obter serviços (IEDI, 2017)

Segundo IEL (2017), sensores e atuadores microeletrônicos são os principais instrumentos de qualquer solução de IoT, além das tecnologias de *Big Data*, *Analytics* e Inteligência Artificial (IA). Estes sensores são denominados *blackbone* ou “sistema nervoso central” e tipicamente são classificados em sete tipos: Grandes Sensores Industriais; Primeira Geração de Sensores; Geração Avançada de Sensores; Sensores Integrados; Sensores *Swarm* (enxame); Sistemas Politrônicos; Eletrônica Impressa.

Com o advento do protocolo de Internet IPv6²⁶, somado à redução de custos de sensores e à miniaturização de componentes eletrônicos, cresce o número de objetos conectados à Internet (*Smart Objects*) e, assim, o número de dados obtidos por estes equipamentos sobre a realidade. No ambiente da produção inteligente, a IoT resulta em maior capacidade de monitoração e controle de todas as ferramentas de produção e, através dos dados coletados, é possível aumentar a produtividade e melhorar a qualidade dos processos. A plataforma IoS, por sua vez, pode ser utilizada para troca de informações através da cadeia de valor, visto que os processos de desenvolvimento, produção e transporte de produtos e materiais podem ser encarados como serviços prestados de forma interna ou externa à empresa (MACDOUGALL, 2014).

Dentro do novo modelo de produção, os sistemas industriais incorporam equipamentos que executam funções direcionadas na busca da referida solução, como por exemplo o medidor inteligente em sistemas de *smart grid*. Por sua vez, as tecnologias de componentes estão focadas

²⁵ Ambos os termos referem-se às expressões em inglês *Internet of Things* (IoT) e *Internet of Services* (IoS).

²⁶ A Internet protocolo IPv6 foi lançada em 2012 e, teoricamente, possibilita 600 quadrilhões de endereços por milímetro quadrado da superfície da Terra. Isso significa que todos os objetos físicos podem ter seu próprio endereço IP, tornando possível a criação de um mundo de objetos inteligentes em uma Internet das Coisas (MACDOUGALL, 2014).

em segmentos da microeletrônica que constituem âncoras da IoT: sensores, MEMS (*Micro Eletronic Mechanical System*), *smart cards*, RFID e ASIC (desde o *design* até as tecnologias de empacotamento). Por fim, o *software* dedicado apresenta-se como elemento essencial na definição da funcionalidade do sistema.

Além da sua aplicação no processo produtivo, a IoT e IoS têm utilidade em diferentes áreas, tais como: gestão ambiental, gestão de energia, gestão de sistemas urbanos e segurança patrimonial e de ativos (IEL, 2017). Portanto, a ampla conectividade dos sistemas de IoT e IoS constitui um forte atrativo à digitalização de produtos e objetos, tornando o desenvolvimento de produtos inteligentes um fator imprescindível para o modelo de produção emergente.

O *Cluster* Tecnológico Produção Inteligente e Conectada refere-se ao uso de sistemas ciberfísicos (CPS) interconectados, digitalização, processamento e otimização da cadeia produtiva, com crescente utilização de inteligência artificial. Em tese, trata-se do próprio modelo de produção emergente, uma vez que, em conjunto, essas tecnologias representam uma nova forma de produzir e organizar a produção no chão de fábrica e as relações verticais das cadeias produtivas. A implementação de sistemas ciberfísicos no processo produtivo dá origem ao termo popularmente conhecido como “Fábrica Inteligente” (*Smart Factory*) (IEDI, 2017; IEL, 2017).

Os elementos fundamentais da Produção Inteligente e Conectada são a fusão do mundo físico e virtual; a utilização de sistemas ciberfísicos, permitindo, assim, maiores níveis de automação e representação gráfica dos processos produtivos; e a flexibilidade da cadeia produtiva com informação disponível em tempo real para fornecedores e clientes. As tecnologias desse *Cluster* podem ser divididas em dois campos: tecnologias próprias (núcleo duro) e tecnologias associadas.

O núcleo duro é composto por robótica autônoma e colaborativa, manufatura aditiva (impressoras 3D e materiais para manufatura aditiva), novos materiais e virtualização da produção (sistemas ciberfísicos). Por sua vez, as tecnologias associadas abrangem as Tecnologias de Redes de Comunicação, *Big Data*, Internet das Coisas (IoT) e Serviços (IoS) e *Blockchain*. Além disso, as tecnologias associadas complementam e interceptam as tecnologias-chave do núcleo duro, especialmente no que diz respeito à virtualização da produção (IEL, 2017).

Muitas são as expectativas criadas ao redor do novo modelo de produção, visto que o processo produtivo inteligente promete potencializar as sinergias entre as atividades de chão de fábrica e as de engenharia. Macdougall (2014) afirma que esse fenômeno representa uma

revolução na produção em termos de inovação e economia de custo e tempo, e a criação de valor a partir de um modelo de produção “de baixo para cima” caracteriza novas e mais oportunidades de mercado.

Como exemplo, pode-se destacar o aprofundamento da interação entre a engenharia de desenvolvimento de produtos inteligentes (especialmente máquinas, equipamentos e componentes) e a engenharia de processos, que busca soluções capazes de incorporar maior inteligência aos produtos, tanto na sua especificação como na sua funcionalidade. Essa tendência é potencializada pela necessidade de desenvolvimento de produtos e serviços que sejam capazes de se conectar às redes de IoT e IoS (DE PAULA, 2017).

Nota-se, portanto, que o *Cluster* Produção Inteligente e Conectada é fortemente impactado pelo desenvolvimento dos demais *Clusters* citados anteriormente, o que demonstra seu caráter transversal. Ademais, a geração de valor no novo modelo de produção não se dá apenas na etapa de fabricação, mas sobretudo nas etapas a montante e a jusante da produção. As etapas a montante incluem atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D), cadeia de suprimentos e planejamento de processos, por exemplo. Já as etapas a jusante incluem a distribuição, manutenção e monitoramento do ciclo de vida do produto.

O *Cluster* Tecnológico Materiais Avançados configura os avanços sobre os materiais tradicionais, englobando materiais novos ou modificados com desempenho, estrutural ou funcional, superior em uma ou mais características críticas para sua aplicação comercial. Entretanto, a sua comercialização está condicionada aos avanços científicos e tecnológicos, além de fatores relacionados a custos, logística, regulamentação e demanda do próprio mercado. À medida que essas restrições forem rompidas, esses materiais permitirão a introdução de produtos inovadores ou superiores aos existentes em mercados de novos produtos.

De acordo com IEL (2017), os materiais avançados são divididos em cinco grupos:

- i. Nanomateriais, seus produtos e processos: destacam-se os materiais 2D, nanotubos de carbono e nanocompósitos poliméricos;
- ii. Materiais Autorreparáveis e/ou Funcionais: encontram-se os compósitos carbono-vidro autorreparáveis, polímeros termorreversíveis, materiais para liberação controlada (fármacos, repelentes, fragrâncias, defensivos e nutrientes), têxteis (bioinspirados e novos filamentos), dentre outros;

- iii. Materiais de elevado desempenho: estão presentes as ligas leves de elevada resistência mecânica e térmica, materiais leves para proteção balística, materiais para impressão 3D, materiais avançados estruturais e outros;
- iv. Materiais de Fontes Renováveis e Produtos de Biorrefinaria: entre eles, nanocelulose, fibra de carbono verde e biopolímeros (regeneração de tecidos, biodegradáveis, etc.);
- v. Terras raras: compostos e liga de terras raras para aplicação em imã permanente de elevado produto energético.

Em relação à sua aplicação no processo produtivo inteligente, estes materiais apresentam usos específicos a depender de cada grupo de tecnologias. Dentre os grupos tecnológicos, apenas os nanomateriais apresentam um conjunto de materiais com um amplo espectro de aplicações. Vários deles são considerados materiais que se encontram como insumos de outros segmentos industriais. Por outro lado, outros nanomateriais podem ter aplicações específicas, como é o caso daqueles para dispositivos eletrônicos.

O *Cluster* Tecnológico Nanotecnologia tem seu alicerce formado no desenvolvimento da nanociência e nanotecnologia, áreas da ciência e da tecnologia que lidam com a matéria na escala nanoscópica, e aplicam os conceitos e materiais produzidos a partir desses avanços. As nanotecnologias são classificadas de acordo com suas gerações tecnológicas, divididas em quatro gerações: a primeira geração são as nanoestruturas passivas; a segunda, as nanoestruturas ativas; a terceira os sistemas de nanossistemas; e a quarta geração é representada pelos sistemas moleculares (IEL, 2017).

Segundo IEL (2017), esse *Cluster* Tecnológico encontra-se em processo de transição da segunda geração de tecnologias, nanoestruturas ativas – utilizadas em eletrônica, sensores, medicamentos, objetos e estruturas adaptativas, para a terceira geração, dos sistemas de nanossistemas – aplicados em redes 3D em robótica, estruturas moleculares e montagem molecular guiada. Além dessas aplicações, os desafios da terceira geração de nanotecnologias se concentram em seis áreas de uso: nanomedicina (diagnóstico, terapia e “teranósticos”) e nanocosméticos; nanoeletrônica e novos materiais; vestuário e dispositivos flexíveis e vestíveis; sensoriamento para internet das coisas; nanotecnologia para energia; e nanotecnologia para alimentos.

Por fim, o *Cluster* Tecnológico Armazenamento e Coleta de energia compreende tanto os processos de Armazenamento Eletroquímico de Energia (AE ou AEE), através da utilização

de uma reação química (reação redox) para armazenar energia, bem como o conjunto de técnicas e mecanismos que buscam aproveitar pequenas quantidades de energia de processos físicos e mecânicos ou do ambiente, transformando-as em energia útil - *Energy Harvesting* (IEDI, 2017; IEL 2017).

Além das baterias tradicionais, com aplicações mais diversas e específicas, destacam-se as tecnologias de células a combustível, células fotovoltaicas, sistemas eólicos, sistemas de energia solar, dentre outros. Entretanto, algumas destas tecnologias ainda se encontram em fase embrionária. O campo de conhecimento envolvido neste *Cluster* é muito amplo, o que faz com ele seja dependente de avanços em outras áreas, como novos materiais, nanotecnologia (técnicas para introdução de características específicas em materiais) e biotecnologia (DE PAULA, 2017).

O avanço dessas tecnologias permitirá aumentar a eficiência energética de equipamentos e garantirá a autonomia de sensores e transmissores dispersos nas plantas industriais, tornando assim, fator decisivo para a viabilização e robustez do processo produtivo inteligente. IEL (2017) ressalta que o uso dessas tecnologias dependem, ainda, de fatores técnicos, como portabilidade (relação potência/peso), duração da recarga, potência máxima nominal e real, e segurança de uso. Quanto maiores esses fatores, maior o potencial de uso e de impacto disruptivo. Além disso, quanto maior a intensidade energética de uma atividade industrial e a disponibilidade de fontes alternativas de armazenamento e coleta de energia, maiores são as vantagens de custos, maior é a mobilidade dos fatores de produção e menor é o impacto ambiental.

Assim, o desenvolvimento destes *Clusters* Tecnológicos apresenta um grande potencial disruptivo, uma vez que o atual modelo de produção tende a sofrer mudanças substanciais no seu *modus operandi*, resultando no surgimento de um novo padrão de produção. Ademais, o avanço e difusão dessas tecnologias abrem espaço para infinitas oportunidades para novas empresas e mesmo empresas maduras, com o surgimento de novos segmentos de mercado e novas formas de produzir e gerenciar a cadeia produtiva. Portanto, essas tecnologias podem constituir fortes ameaças às empresas já estabelecidas, diminuindo as barreiras para novos entrantes, assim como fortes benefícios, reforçando as barreiras vigentes.

Cabe ressaltar que “Indústria 4.0” é um tema recente e que vêm ganhando espaço na agenda de desenvolvimento dos países, no qual têm resultado num número expressivo de programas direcionados ao futuro da indústria no âmbito deste temática. De modo geral, os esforços tecnológicos estão concentrados em antever as tecnologias disruptivas do novo modelo

de produção, representando, portanto, mais dúvidas do que certeza sobre as novas tecnologias. Além disso, as incertezas em torno da Indústria 4.0 acaba reforçando a cultura empresarial em investir em tecnologias que já foram testadas e provadas, o que por sua vez, pode inibir a adoção das novas tecnologias

Ademais, é importante destacar que muito tem se falado nos impactos da Indústria 4.0 no mercado de trabalho. A introdução de robôs e o maior nível de automação nas indústrias tendem a diminuir os requisitos de mão-de-obra, além de eliminar tarefas manuais, representando, portanto, numa menor oferta de vagas no mercado de trabalho, principalmente aquelas de menor qualificação profissional. É claro que com o avanço destas tecnologias, outras profissões surgirão e exigirão dos profissionais novas qualificações, e nesse ponto, os investimentos governamentais tornam-se essenciais. Isso porque a presença destes podem alavancar a difusão das novas tecnologias, bem como podem desestimular sua disseminação.

3.2. A difusão das tecnologias da Indústria 4.0 na siderurgia mundial

A chamada Indústria 4.0 tornou-se o tema tecnológico do momento, seja nas economias desenvolvidas ou nos países emergentes. Embora estas tecnologias estejam se difundindo mais rapidamente em indústrias de alta tecnologia, na indústria do aço elas estão sendo implementadas cautelosamente. Isso porque a siderurgia já foi automatizada e vem coletando e armazenando dados dos seus processos produtivos por muitos anos.

De acordo com Pinkham (2018), muitas das tecnologias que suportam a Indústria 4.0 não são novas, como por exemplo, os algoritmos para aprendizado de máquina, os quais melhoram a capacidade de entender padrões de dados e de usar esses padrões no processo de tomada de decisão, já existem há vários anos. Ainda segundo este autor, o que é novo no setor é a mudança de mentalidade sobre os conceitos da Indústria 4.0, pois as empresas siderúrgicas estão se conscientizando de que os dados que estão coletando em suas fábricas são um ativo muito valioso e que estes poderiam ser utilizados para melhorar seus processos de produção.

Ademais, o fato é que com o desenvolvimento destas tecnologias tornou-se mais fácil a coleta, a análise e correlação desses dados, em relação ao que era no passado, possibilitando, assim, uma melhor compreensão do que está acontecendo no processo siderúrgico.

Peters (2017) apresenta uma visão similar à de Pinkham, ao afirmar que a “Indústria 4.0 é mais um paradigma ou filosofia do que apenas uma tecnologia”, ou seja, trata-se de uma

mudança cultural associada às novas tecnologias. Além disto, Peters (2017) elenca as principais implicações da Indústria 4.0 para a siderurgia, a saber:

- i. Planta única com um sistema de produção ciberfísico (*Cyber Physical Systems - CPS*);
- ii. Total rastreabilidade dos produtos intermediários e finais;
- iii. Produto “inteligente” com conhecimento de sua própria qualidade e histórico de produção (um aspecto de engenharia de ponta-a-ponta);
- iv. Redes intensivas e comunicação de todas as plantas (“integração horizontal” dentro da empresa);
- v. Comunicação intensiva ao longo de toda a cadeia de abastecimento (“integração horizontal” externa à empresa);
- vi. Manipulação e uso adequados de todos os dados;
- vii. Descentralização (auto-organização) em vez de soluções centralizadas.

Dessa forma, as novas tecnologias, além de representarem tecnologias disruptivas, permitem solucionar problemas básicos, como manipulação eficiente dos dados e maior interface entre as várias áreas do processo produtivo, uma vez que estas diferentes etapas não necessariamente comunicam-se umas com as outras. A necessidade das empresas siderúrgicas estaria no desenvolvimento de soluções específicas que lhes permitam funcionar como fábricas digitalizadas, condição necessária para alcançar os benefícios da “Indústria 4.0/fábrica inteligente” (PETERS, 2017; PINKHAM, 2018).

Segundo Peters (2016; 2017), os maiores impactos da Indústria 4.0 sobre a siderurgia mundial se referem mais à eficiência operacional do que à alteração em seus *modi operandi* propriamente dita, e compreendem as seguintes vantagens: apoio à decisão em relação ao controle de qualidade; controle inteligente da cadeia produtiva através da automação de processos; avaliação inteligente de grandes quantidades de dados; reprogramação de materiais; sistemas de assistência inteligentes (por exemplo, *drones*); e manutenção inteligente (preditiva).

A Associação Latino-Americana do Aço (Alacero) apresentou, no seu 58º congresso, os principais desenvolvimentos das empresas provedoras de tecnologia siderúrgica relacionadas à Manufatura Digital. Dentre os fornecedores especializados destacam-se a SMS Group, Primetals Technologies e Danieli (ALACERO, 2018).

No que diz respeito à coleta de dados e ao uso eficiente das informações geradas durante o processo produtivo, a SMS Group anunciou o desenvolvimento de tecnologias que permitem alcançar um maior nível de conectividade dentro da indústria através de redes máquina a máquina (*machine to machine* – M2M) e análise inteligente dos dados, tais como:

- i. Digitalização dos processos dos diferentes equipamentos de lingotamento contínuo (moldes e segmentos) nos quais a transferência de dados do sistema de gerenciamento de manutenção e banco de dados é utilizada para prever a qualidade do aço;
- ii. Monitoramento em tempo real do processo siderúrgico por meio da detecção de radiofrequência combinada com infravermelho (RFID/IR) com modelos de temperatura do corpo da carcaça da caçamba, refratário e carga, atingindo a digitalização completa de todos os processos relativos ao manuseio da caçamba;
- iii. Uso de *Big Data* e Inteligência Artificial para montagem de um modelo do processo conversor LD que permite prever o conteúdo de temperatura, carbono, ferro e fósforo no final do sopro e adaptar os parâmetros sobre matérias-primas e desgaste do conversor ao longo de uma campanha (vida útil do refratário);
- iv. Sistema de análise da qualidade do produto através de monitoramento proativo e controle da produção.

Um dos pontos críticos na siderurgia trata-se da gestão de manutenção e ativos em geral. Por se tratar de um processo contínuo, paradas não programadas para consertar ou substituir os principais componentes devido à quebra apresentam um elevado custo para as siderúrgicas. Os principais ativos críticos na siderurgia são atuadores hidráulicos, mancais, acionamentos principais, cilindros de trabalhos etc. No caso de peças sobressalentes não estarem disponíveis no estoque ou em uma base de entrega rápida, uma quebra pode resultar em uma parada da usina (WINTER *et al.*, 2018).

Nesse sentido, a Primetals apresentou uma moderna tecnologia de gestão, denominada Manutenção Inteligente e Gestão de Ativos (*Smart Maintenance & Asset Management*), que permitem um ajuste dinâmico da estratégia, medidas de manutenção preditiva e preventiva, a partir de uma análise contínua das fraquezas e tomada de decisões baseadas em dados analíticos e experiência empírica. O aprendizado de máquina (*machine learning*) e a manutenção preditiva são utilizados para prever quando um dispositivo mecânico se desgastará ou quebrará,

permitindo, assim, que os atuadores sejam substituídos antes que eles se quebrem (ALACERO, 2018; WINTER *et al.*, 2018).

Já a Danieli apresentou tecnologias que permitem simplificar a complexidade das operações na siderurgia, dentre elas destacam-se:

- i. O controle da aciaria elétrica (EAF) com um modelo preditivo baseado em aprendizado automático (*machine learning*) alimentado pelos dados do processo, incluindo um ciclo de controle adaptativo, ação sobre os injetores e a captura das variáveis para formação de um banco de dados do processo, que permite ganhos de produtividade, redução de tempo entre os fluxos e consumo de eletricidade e carvão;
- ii. Gerenciamento automático de guindastes com tecnologias avançadas de visão (com 4 sensores longitudinais e transversais), incluindo exposição de uma imagem 3D em tempo real;
- iii. Manipulação automática de depósitos intermediários de placas, tubos e bobinas.

Em relação à Internet das Coisas (IoT), Pinkham (2018) ressalta que a demanda atual das siderúrgicas por estas tecnologias é baixa. Isso ocorre em parte porque a maioria das plataformas de IoT ainda não são maduras, mas principalmente pelo fato das siderúrgicas estarem relutantes em compartilhar dados ou deixar os dados saírem de suas instalações. A Tenova, em parceria com a Microsoft, está desenvolvendo uma plataforma de arquitetura que permitirá a comunicação segura, não apenas entre os diferentes equipamentos das fábricas, mas também entre usuários internos e externos. O projeto busca dar maior segurança às siderúrgicas em relação a IoT e, conseqüentemente, alavancar a difusão destas tecnologias a partir de aplicações específicas (ALACERO, 2018; PINKHAM, 2018).

Uma pesquisa da *PricewaterhouseCoopers* (PWC, 2016a; 2016b), que incorpora mais de 2 mil empresas dos nove maiores setores industriais²⁷ em 26 países, apontou que 31% das empresas metalúrgicas (incluindo siderurgia) declararam já ter alcançado um nível avançado de digitalização, enquanto 62% esperam atingir esse patamar nos próximos 5 anos. Embora estejam adotando lentamente as novas tecnologias, os números indicam que as metalúrgicas estão alinhadas com a média da indústria (33% e 72%, respectivamente). Apenas 11% das

²⁷ Os setores são: Aeroespacial, Defesa e Segurança; Automotivo; Química; Eletrônica; Engenharia e Construção; Celulose, Papel e Embalagens; Manufatura Industrial; Metais; Transportes e Logística.

empresas de metais possuem capacidade avançada relativa a *data analytics*, contra 18% da amostra completa.

As metalúrgicas planejam investir o equivalente a 4% (US\$ 55 bilhões) de suas receitas anuais em soluções digitais até 2020, nível ligeiramente inferior ao total da amostra (5% - US\$ 907 bilhões). Quanto aos benefícios da Indústria 4.0, as metalúrgicas esperam reduzir seus custos em 3,2% ao ano, contra 3,6% da amostra total, ao passo que a expectativa de incremento de receita é de 2,7% ao ano, ligeiramente abaixo da média da amostra (2,9%). No que concerne ao retorno financeiro das tecnologias digitais, 58% das metalúrgicas esperam retornos em menos de dois anos, 37% acreditam em um retorno entre dois a cinco anos, enquanto 5% estimam que ultrapasse cinco anos. Os valores são bem similares aos da amostra como um todo, com 55%, 37% e 8%, conforme o Quadro 6 (PWC, 2016a).

Quadro 6 – Indústria 4.0 e a relação investimento *versus* benefícios

Descrição	Metalurgia	Global
Investimentos em soluções digitais (% da receita/ano)	4,0%	5,0%
Redução de custos (ano)	3,2%	3,6%
Incremento de receita (ano)	2,7%	2,9%
Retorno financeiro em menos de 2 anos	58,0%	55,0%
Retorno financeiro entre 2 a 5 anos	37,0%	37,0%
Retorno financeiro acima de 5 anos	5,0%	8,0%

Fonte: PWC (2016a). Elaboração própria.

No que diz respeito aos obstáculos relacionados à Indústria 4.0, o Quadro 7 compara os principais desafios apontados pelas empresas metalúrgicas e a correspondente visão da mostra completa. Para a indústria metalúrgica, os principais desafios são: 1) A falta de cultura e treinamento digitais (49%); 2) Incerteza em relação aos benefícios econômicos (49%); 3) A falta de uma visão clara sobre operações digitais e de apoio e liderança por parte da alta administração (39%); 4) A incapacidade de parceiros comerciais para fornecer soluções digitais adequadas (29%); 5) Necessidade de grande volume de investimentos (28%); 6) A falta de talentos (23%).

Quadro 7 – Principais desafios relacionados à Indústria 4.0

Descrição	Metalurgia	Global
Falta de cultura e treinamentos digitais	49,0%	50,0%
Incerteza em relação aos benefícios econômicos	49,0%	40,0%
Falta de visão clara sobre operações digitais e de apoio e liderança por parte da alta administração	39,0%	38,0%
Incapacidade dos parceiros comerciais em fornecer soluções digitais adequadas	29,0%	16,0%
Grande volume de investimentos	28,0%	36,0%
Falta de talentos	23,0%	25,0%

Fonte: PWC (2016a; 2016b). Elaboração própria.

Analisando casos concretos, Kinch (2017) descreve a experiência do Instituto Posco, em parceria com o Departamento de Engenharia de Gerenciamento de Sistemas da Universidade de Sungkyunkwan, no uso combinado de Inteligência Artificial e *Big Data* na linha de galvanização contínua na usina de Gwangyang. Os principais benefícios foram:

- i. Melhoria da qualidade das chapas e redução do consumo de zinco, em decorrência da redução do desvio do revestimento de zinco de 7 g/m² na operação manual para 5 g/m² com o novo sistema;
- ii. Automação do controle do alto-forno por meio de *deep learning*, resultando em uma diminuição de 18% no desvio de temperatura;
- iii. No laminador de chapas grossas foi implementado um controle de precisão de deformação durante o processo de têmpera por meio de *Big Data*, que possibilitou uma redução no tempo de análise dos engenheiros pela metade;
- iv. Uso de sensores para medir a concentração de gás no forno de reaquecimento do laminador de tiras a quente, reduzindo a necessidade de combustível em 5%.

Segundo De Paula (2017), o caso do Instituto Posco reforça a trajetória dos *Clusters Tecnológicos* em direção à otimização dos processos mais do que à disrupção propriamente dita. Ademais, segundo o autor, o uso destas tecnologias tende a proporcionar bons retornos financeiros, uma vez que a necessidade de investimentos é relativamente baixa para os padrões da indústria, e um período curto para obtenção de resultados.

Além disso, o caso demonstra a importância das siderúrgicas buscarem parcerias que viabilizem a aplicação destas tecnologias em suas plantas produtivas. Dado que os equipamentos tendem a durar até 50 anos e muitos sistemas de automação nas siderúrgicas têm entre 15 e 25 anos, pode ser difícil integrar as tecnologias da Indústria 4.0 nas operações existentes, principalmente pela falta de padrões semânticos unificados na indústria siderúrgica e/ou sem as interfaces técnicas necessárias (PINKHAM, 2018).

Ainda que estejam em estado inicial, algumas usinas siderúrgicas – tanto novas quanto já estabelecidas – começaram a incorporar os conceitos da Indústria 4.0. A Big River Steel talvez seja o caso mais emblemático atualmente, embora os impactos não possam ser creditados exclusivamente aos *Clusters* Tecnológicos investigados. Entretanto, cabe destacar seu caso como exemplo da influência das novas tecnologias sobre o incremento da produtividade e o encurtamento do *ramp-up* (DE PAULA, 2017).

A Big River Steel foi projetada para se tornar a primeira siderúrgica de aprendizagem do mundo, ambientalmente engenhosa e tecnologicamente avançada, na qual foram investidos US\$ 1,6 bilhão. O projeto foi anunciado em 2013 e suas operações comerciais iniciaram no início de 2017. Trata-se de uma usina de aços planos (*mini-mill*) com capacidade nominal de 1,5 milhões de toneladas de aço por ano, contando com aciaria elétrica (EAF), laminação a quente, laminação a frio e galvanização. A empresa afirma ser a única usina da América do Norte a contar com um desgaseificador a vácuo do tipo RH (Ruhrstahl Heraeus) – equipamento que permite a produção de aços com teores ultrabaixos de carbono – conectado a uma aciaria elétrica voltada à produção de placas. A usina é capaz de produzir competitivamente aços mais nobres, desde aços de alta resistência e baixa liga (*high-strength low-alloy* – HSLA) até aços elétricos complexos, classes de tubos de energia e dimensões de bobinas placas diversas (MPT INTERNATIONAL, 2017; DE PAULA, 2017)

A Big River Steel optou por ter um único fornecedor (SMS Group) para todos os equipamentos da planta e os sistemas elétricos e de automação, a fim de superar os problemas de configuração de interfaces e falta de desempenho quando os sistemas de diferentes provedores não se comunicam adequadamente. Além disso, toda a cadeia de processos da usina é mapeada digitalmente através dos mais de 50 mil sensores, onde são monitorados e coletados de 3 a 4 terabytes de dados mensalmente (MPT INTERNATIONAL, 2017; ADJOGBLE, 2018).

A grande disponibilidade de dados levou a Big River Steel a contratar a Noodle.ai, uma startup do Vale do Silício, para implementar o Enterprise AI para otimizar as suas operações.

A plataforma de Inteligência Artificial associada aos serviços de Computação em Nuvem permitiriam melhorias inovadoras em áreas como planejamento de manutenção, programação de linhas de produção, operações logísticas e proteção ambiental (MPT INTERNATIONAL, 2017). Ademais, de acordo com Noldin Jr. (2017), a operação de sistemas em nuvem resulta em dezenas de milhões de dólares de economia em infraestrutura de rede e, ao mesmo tempo, maior segurança de dados.

Segundo De Paula (2017), o alto nível de automação da Big River Steel reflete diretamente os resultados alcançados até o momento, a saber: 1) alta produtividade e elevado rendimento dos processos: contando com 435 funcionários, a siderúrgica perfaz quase quatro mil toneladas anuais de aço por trabalhador²⁸; 2) rápido *ramp-up*, atingindo 80% da capacidade instalada no quarto mês de operação; 3) menor impacto ambiental, em que o consumo de água é 30% e o de energia, 18% inferior ao de usinas com a mesma tecnologia de produção (o lingotamento de placas finas – *thin-slab-casting*).

No entanto, há uma grande preocupação das siderúrgicas em implementar as novas tecnologias, principalmente em relação à segurança dos dados, incluindo a quantidade de dados que as empresas desejam expor ao ambiente externo ou o quanto elas querem manter internamente. Na visão De Paula (2017), os ataques cibernéticos seriam o maior temor das empresas. Esse mesmo autor, cita dois ataques recentes a empresas siderúrgicas, conforme discutido a seguir.

O primeiro caso ocorreu em 2014, quando o Escritório Federal de Segurança da Informação da Alemanha (*Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik* – BSI) reportou em seu relatório anual um ataque cibernético a uma siderúrgica. Inicialmente foi mencionado que o ataque casou danos maciços, sem especificar detalhes técnicos ou localização da planta siderúrgica. Entretanto, num segundo momento, foi identificado que este teria causado danos físicos por ter impedido o perfeito funcionamento do alto-forno. O segundo episódio ocorreu em 2016, em que o Grupo ThyssenKrupp reconheceu publicamente que segredos técnicos comerciais foram roubados de sua divisão siderúrgica, mas sem mencionar os locais específicos infectados ou especular sobre suspeitos prováveis (DE PAULA, 2017).

²⁸ A empresa que mais se aproximou dos resultados obtido pela Big River Steel, em termos de produtividade, foi a também norte-americana Nucor Steel, que produziu 22 milhões de toneladas de aço bruto em 2016 com 23.900 empregados (DE PAULA, 2017).

3.3. A difusão das tecnologias da Indústria 4.0 na siderurgia brasileira

Essa seção tem como objetivo avançar nas discussões sobre a Indústria 4.0 e seus impactos na siderurgia brasileira. O projeto Indústria 2027, publicado em 2018, buscou identificar os *Clusters* Tecnológicos relevantes e sua difusão nos Sistemas Produtivos, a saber: Agroindústria, Insumos Básicos, Química, Petróleo e Gás, Bens de Capital, Complexo Automotivo, Aeroespacial e Defesa, Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC's), Farmacêutica e Bens de Consumo. Em relatório deste projeto, De Paula (2017) buscou investigar a percepção das empresas siderúrgicas brasileiras quanto ao ritmo de difusão dos *Clusters* Tecnológicos na siderurgia mundial.

Assim, esta Dissertação buscou realizar um esforço complementar aos trabalhos publicados recentemente que discutem essa temática, contribuindo, de modo geral, aos trabalhos publicados no âmbito do projeto Indústria 2027, ao adotar o mesmo recorte de *Clusters* Tecnológicos e, adicionalmente, aprofundar a discussão sobre a sua difusão na economia brasileira, especificamente no setor siderúrgico. Logo, trata-se de um trabalho provavelmente inédito sobre a siderurgia brasileira.

Do ponto de vista metodológico, optou-se pelo questionário eletrônico, ao invés de uma entrevista presencial, dado que o tema é emergente e envolve várias áreas das companhias. Em um segundo momento, foram realizados contatos via telefone e/ou e-mail para confirmar as informações fornecidas e esclarecer pontos relevantes. Na primeira etapa da pesquisa foi realizado um teste piloto com a siderúrgica ArcelorMittal Tubarão, entre os meses de junho e agosto de 2018, de modo a verificar a aderência do questionário aos objetivos desta Dissertação. Após os ajustes necessários, o questionário definitivo foi encaminhado para as demais empresas consultadas. Esta segunda etapa da pesquisa iniciou-se em setembro e foi finalizada em dezembro de 2018.

Cabe destacar, também, que os especialistas entrevistados são profissionais da área de TI e estão diretamente envolvidos com os planos de trabalhos relacionados à Indústria 4.0, além de ocuparem cargos de especialistas ou gestão, ou seja, estão alinhados com as diretrizes corporativas e em constante contato com a cúpula executiva.

O parque siderúrgico brasileiro é composto por 29 usinas, distribuídas em 11 grupos empresariais, conforme o Quadro 8. A amostra contempla seis das dez maiores siderúrgicas brasileiras em termos de volume de produção, a saber: ArcelorMittal Tubarão (AMT); Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP); Gerdau; Ternium Brasil; Usiminas; Vallourec.

Quadro 8 – Parque Siderúrgico Brasileiro

Empresa	Produção 2017 (10³t)	Nº de Usinas	Nº de Empregados	Estrutura Societária	Segmento de Mercado
Aperam South America	716	1	2.285	Capital Aberto	Laminados Planos Comuns Não Revestidos / Laminados Planos (Especiais/Ligados)
ArcelorMittal Aços Longos¹	2.891	3	2.049	Capital Fechado (Estrangeiro)	Laminados Longos
ArcelorMittal Sul Fluminense²	1.032	2	1.542	Capital Fechado (Estrangeiro)	Laminados Longos
ArcelorMittal Tubarão	7.198	1	5.423	Capital Fechado (Estrangeiro)	Laminados Planos Comuns Não Revestidos e Comuns Revestidos
Companhia Siderúrgica Nacional - CSN	4.426	1	Aprox. 20.000	Capital Aberto	Laminados Planos Comuns Não Revestidos e Comuns Revestidos / Laminados Longos (Aços Carbono e Especiais/Ligados)
Companhia Siderúrgica do Pecém - CSP	2.455	1	2.486	Capital Fechado	Laminados Planos
Gerdau³	6.955	13	14.038	Capital Aberto	Laminados Planos Comuns Não Revestidos / Laminados Longos (Aço Carbono e Especiais/Ligados)
Sinobras	389	1	1.300	Capital Fechado (Nacional)	Laminados Longos (Aços Carbono e Especiais/Ligados)
Ternium Brasil	4.497	1	4.038	Capital Aberto	Laminados Planos
Usiminas⁴	3.012	2	12.842	Capital Aberto	Laminados Planos Comuns Não Revestidos e Comuns Revestidos
Vallourec do Brasil⁵	671	2	5.425	Capital Fechado (Estrangeiro)	Laminados Longos (Aços Carbono e Especiais/Ligados)
Villares Metals	108	1	Aprox. 1.400	Capital Fechado (Estrangeiro)	Laminados Longos (Aços Carbono e Especiais/Ligados)
Total	34.350	29			

Fonte: IABr. Elaboração própria.

Nota: (1) ArcelorMittal Aços Longos compreende as usinas de Juiz de Fora (MG), Monlevade (MG) e Piracicaba (SP); (2) ArcelorMittal Sul Fluminense compreende as usinas de Barra Mansa (RJ) e Resende (RJ); (3) Gerdau engloba as usinas Açonorte, Araçariguama, Araucária, Barão de Cocais, Cearense, Charqueadas, Divinópolis, Mogi das Cruzes, Ouro Branco, Pindamonhangaba, Riograndense, Santa Cruz, São Paulo e Usiba; (4) Usiminas engloba as usinas de Cubatão e Ipatinga; (5) Vallourec do Brasil compreende as usinas do Barreiro (MG) e Jeceaba (MG).

A siderurgia brasileira é predominantemente formada por empresas de grande porte, ou seja, com mais de 500 funcionários. Dentre as empresas consultadas, há uma grande variabilidade no que diz respeito ao número de funcionários e toneladas de aço produzido. A ArcelorMittal, por exemplo, produziu aproximadamente 7,2 milhões de toneladas de aço bruto, empregando um total de 5.423 funcionários, ao passo que a Usiminas produziu aproximadamente 3,0 milhões de toneladas de aço bruto com 12.842 funcionários. É claro que tais comparações são subjetivas e, portanto, deve ser considerada a cadeia produtiva de cada empresa, seu mercado de atuação, dentre outros fatores.

Em relação à estrutura societária das empresas siderúrgicas consultadas, esta é bastante diversificada. Empresas como a Gerdau, Ternium Brasil e Usiminas são companhias de capital aberto e têm suas ações negociadas nas principais bolsas de valores. Enquanto as siderúrgicas ArcelorMittal e Vallourec do Brasil são empresas de capital estrangeiro. A exceção é a Companhia Siderurgia do Pecém (CSP), que é uma *joint venture* binacional formada pela brasileira Vale (50% de participação) e pelas sul-coreanas Dongkuk (30%) e Posco (20%).

Ademais, as companhias consultadas responderam, conjuntamente, por 72,2% da produção de aço bruto em 2017. Além da representatividade no volume de produção, trata-se de um conjunto de empresas com características distintas no que diz respeito à heterogeneidade tecnológica e produtiva, dado que suas plantas produtivas incorporam equipamentos de diferentes safras tecnológicas e atendem a diferentes segmentos de mercado. Além disso, são empresas com elevada compreensão das tendências mundiais e nacionais, uma vez que estão inseridas nos diversos mercados consumidores de produtos siderúrgicos.

Por questões de confidencialidade, os resultados serão discutidos conjuntamente, de modo que os erros de interpretação são de responsabilidade exclusiva deste autor.

3.3.1. Aplicações e ritmo de difusão

Na percepção das empresas consultadas, os *Clusters* Tecnológicos que dão origem à Indústria 4.0 apresentam uma gama de aplicações no que diz respeito à produção do aço, podendo variar conforme a etapa do processo produtivo.

Na etapa de preparação das cargas, todas as tecnologias podem ser aplicadas de forma mais intensiva, com exceção das relacionadas a Materiais Avançados e a Nanotecnologia. No pátio de matérias-primas, a IoT vem sendo utilizada no monitoramento de pessoas e máquinas móveis por meio de tecnologia RFID, monitoramento de veículos via GPRs e monitoramento

de equipamentos e processos via sensores sem fio (vibração, temperatura, pressão, etc). De modo geral, esses sensores têm como objetivo coletar e registrar informações sobre o dimensionamento das matérias-primas, além de controlar as interações com o ambiente externo (homem-máquina).

Já as tecnologias de rede de comunicação são responsáveis por transportar os dados gerados para os vários sistemas especialistas, por exemplo o MES (*Manufacturing Execution System*). Este *software* gerencia os níveis de informações inferiores e emula as informações para a elaboração de relatórios gerenciais que são enviados para os sistemas integrados, por exemplo o SAP/ERP, e estes registram e comunicam essas informações para as próximas etapas do processo produtivo. Além disso, a implementação de redes com alta capacidade de comunicação tem possibilitado o tráfego de imagens para funcionalidades de vídeo *analytics*, possibilitando a análise do processo produtivo em tempo real.

Por sua vez, a aplicação do *Cluster* Inteligência Artificial, *Big Data* e Computação em Nuvem está restrita apenas à primeira tecnologia, fenômeno que não é exclusivo desta etapa do processo siderúrgico. Segundo De Paula (2017), este fato ocorre por dois motivos: 1) a difusão atual dessas tecnologias na siderurgia mundial é baixa; e 2) a aplicação da Inteligência Artificial ocorre de forma desarticulada com as outras duas tecnologias. Portanto, a Inteligência Artificial tem sido utilizada em sistemas especialistas de sinterização/pelotização, soft sensor (análise química *online* do sinter), blindagem e na tomada de decisão no processo de descarga de materiais, como melhor rota, tempos de descarga e necessidade de materiais, além de aplicações relacionadas à segurança do trabalho, como os circuitos internos de monitoramento combinados com sensores infravermelho (CFTV/IVA).

O *Cluster* Produção Inteligente e Conectada, de modo geral, reflete a aplicação das tecnologias citadas acima, incluindo aquisição de equipamentos com inteligência embarcada e automatismo em geral, além de integração horizontal com fornecedores. A gama de informações geradas e processadas pelos equipamentos visa regular a velocidade/nível de produção nas etapas subsequentes. Por fim, as tecnologias de Armazenamento e Coleta de Energia buscam reduzir o consumo de energia por meio de recuperação ou aproveitamento, principalmente, pela utilização de processos térmicos e/ou geração de gases de coqueria (COG – *Coke Oven Gas*)²⁹.

²⁹ Segundo Yuan (2018), cerca de 55% da energia consumida pelas usinas siderúrgicas brasileiras é proveniente de projetos de co-geração, especialmente de reaproveitamento de gases de processos, e de autogeração.

No processo de redução, também se aplicam estas tecnologias, podendo inclusive serem utilizadas de forma mais ampla. A implementação de sensores nos altos-fornos busca aumentar a eficiência destes equipamentos e a otimizar as atividades de manutenção, sejam elas preditiva ou corretiva. Outro exemplo é o processo de transporte de ferro-gusa líquido, que atualmente ocorre via carros torpedos (modal ferroviário) totalmente automatizados e com interação com as condições externas, o que reforça a preocupação das empresas siderúrgicas com a segurança durante todo o processo de fabricação do aço.

A intensidade de uso dos Materiais Avançados na etapa de redução pode tornar-se mais relevante, dados os desafios inerentes à dificuldade em obter matérias-primas de qualidade, que com o passar dos anos se tornarão mais escassas. No que diz respeito às tecnologias de Armazenamento e Coleta de Energia, essas são utilizadas na recuperação/aproveitamento dos gases de altos-fornos (BFG – *Blast Furnace Gas*).

Na etapa de refino do aço encontram-se as melhores oportunidades, seja nas questões energéticas ou tecnológicas, conforme o Quadro 9. A fabricação de produtos de maior complexidade, visando atender às necessidades de meio ambiente e dos clientes (customização), principalmente por materiais mais leves e resistentes, trazem oportunidades para uso de compósitos associados à nanotecnologia, reforçando a trajetória tecnológica de desenvolvimento de novos produtos. O *Cluster* Inteligência Artificial, *Big Data* e Computação em Nuvem propiciará benefícios significativos, principalmente no contexto da Manufatura Preditiva, tornando realidade a interface entre manutenção e qualidade preditiva associadas ao planejamento inteligente em tempo real.

Quadro 9 – Aplicação dos *Clusters* Tecnológicos por etapa do processo produtivo

<i>Clusters</i> Tecnológicos	Etapa do processo produtivo			
	Preparação das cargas	Redução	Refino	Laminação
Internet das Coisas (IoT) e dos Serviços (IoS)	X	X	X	X
Tecnologias de Redes de Comunicação Rápidas e Seguras	X	X	X	X
Inteligência Artificial, <i>Big Data</i> e Computação em Nuvem	X	X	X	X
Produção Inteligente e Conectada	X	X	X	X
Materiais Avançados	NA	X	X	NA
Nanotecnologia	NA	NA	X	NA
Armazenamento e Coleta de Energia	X	X	X	NA

Fonte: Elaboração própria a partir das empresas consultadas.

Nota: NA – Não se aplica

Assim, inúmeras iniciativas têm sido observadas nessa fase da cadeia produtiva do aço, dentre elas: 1) Implementação de sensores na aciaria para otimizar manutenção e aumentar eficiência dos equipamentos; 2) Utilização de redes com alta capacidade de comunicação para trafegar imagens para funcionalidade de vídeo *analytics*; 3) Aplicação de redes neurais artificiais para predição e controle de parâmetros da produção de aço nos conversores, com o objetivo de controlar temperatura final de vazamento e composição química; 4) Disponibilização de informações de produção do aço líquido para regular a velocidade/quantidade de produção nas etapas a jusante; 5) Adição de ligas metálicas especiais (ferro cromo molibdênio) na composição do aço, a fim de atender propriedades físicas metalúrgicas específicas; 6) Aproveitamento/armazenamento de gases de aciaria (LDG – *Linz-Donawitz Gas* e/ou BOSG – *Basic Oxygen Steelmaking Gas*).

Na etapa de laminação, as oportunidades estão concentradas no conteúdo informacional embarcado aos produtos finais, permitindo um processo no qual os custos poderão ser reduzidos e evitados, tanto em função da qualidade final do produto quanto em relação à redução de *downtime* por parada de equipamento. Desse modo, os *Clusters* com menor impacto de uso são Materiais Avançados, Nanotecnologia e Armazenamento e Coleta de Energia.

No que diz respeito à utilização da IoT, as melhores práticas se concentram na utilização de sensores para monitoramento de processos, como por exemplo: fornos de reaquecimento; laminadores a quente; laminadores a frio; laminadores encruadores; desempenadeiras; linhas de corte e acabamento. Redes de automação para interligação de processos, com destaque para *Industrial Ethernet*, compõem as tecnologias de Redes de Comunicação Rápidas e Seguras. Por sua vez, a utilização de redes neurais artificiais para predição de propriedades físicas em processos de laminação é o grande destaque na utilização da Inteligência Artificial. Em conjunto, essas tecnologias buscam impulsionar o *Cluster* Produção Inteligente e Conectada, ampliando as conexões verticais e horizontais com fornecedores e clientes.

De modo geral, apesar de apresentarem tendência de queda em seus custos, o que, por si só, representa um estímulo à sua adoção, grande parte destas tecnologias ainda estão sendo testadas e, em alguns aspectos, precisam evoluir para ganhar a robustez necessária para os processos industriais. Mesmo diante deste cenário, as empresas consultadas vislumbram que os impactos dos *Clusters* Tecnológicos serão mais intensos nas etapas de refino do aço e laminação. Isso porque o maior controle dos processos nestas etapas poderá proporcionar reduções de custos tanto relacionadas à manutenção preditiva como maior eficiência dos

equipamentos e matérias-primas, ou seja, em ambas as etapas se encontram as melhores oportunidades para melhorar a eficiência operacional e a produtividade das siderúrgicas.

Na percepção das empresas consultadas, a difusão atual dos *Clusters* Internet das Coisas (IoT) e dos Serviços (IoS), Inteligência Artificial, *Big Data* e Computação em Nuvem, Produção Inteligente e Conectada, Materiais Avançados e Armazenamento e Coleta de Energia na siderurgia brasileira é baixa. Por outro lado, as Tecnologias de Redes de Comunicação Rápidas e Seguras apresentam um ritmo de difusão moderado, enquanto a difusão da Nanotecnologia é incipiente (muito baixa).

Os resultados encontrados corroboram a visão das siderúrgicas brasileiras em relação à difusão dos *Clusters* Tecnológicos na siderurgia mundial. Segundo De Paula (2017), a difusão dos *Clusters* Internet das Coisas, Inteligência Artificial, *Big Data* e Computação em Nuvem, Produção Inteligente e Conectada, Materiais Avançados e Armazenamento de Energia é baixa, enquanto para as tecnologias de Redes de Comunicação Rápidas e Seguras a difusão é moderada. Cabe destacar, que o ritmo de difusão do *Cluster* Nanotecnologia na siderurgia mundial é baixo, enquanto o uso desta tecnologia ainda é incipiente na siderurgia brasileira.

Ademais, as empresas consultadas julgam que as barreiras técnicas e/ou econômicas estão diretamente relacionadas ao ritmo atual de difusão, a saber: a) retorno financeiro dos projetos, uma vez que a relação comprovação do uso x benefícios nem sempre é tangível antes de sua aplicação; b) ausência de incentivos governamentais, em especial para aquisição de máquinas e equipamentos com tecnologia embarcada; c) condição regional da América Latina, com baixa qualificação profissional, o que requer a formação de pessoas em algumas destas tecnologias, principalmente aquelas que dependem de um conhecimento técnico muito específico; d) instituições de ensino com grade curricular inadequada ao desafios da Indústria 4.0, o que requer um elevado investimento educacional para obtenção de resultados satisfatórios.

De Paula (2017) identifica que dentre os desafios em âmbito nacional em relação à difusão atual das novas tecnologias, está a falta de um ecossistema que facilite a implementação da Indústria 4.0, compreendendo: universidades, aceleradoras e incubadoras de *startups*, profissionais da indústria capacitados, empresas, centros de tecnologias e outros agentes de transformação. Ademais, na visão do autor é essencial um Plano Nacional da Indústria 4.0 que contemple aspectos financeiros (incentivos às atividades inovadoras), formação de recursos (capacitação de empreendedores e técnicos de automação), regulatórios (diminuição da burocracia para abertura e fechamento de empresas e flexibilização das relações de trabalho),

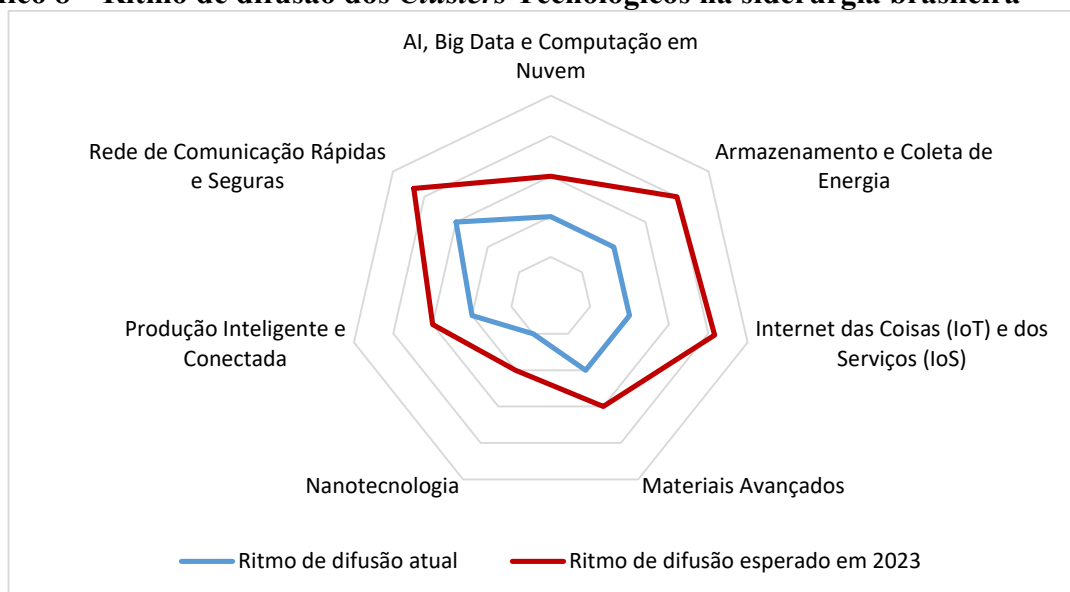
maior adensamento do sistema nacional de inovações (cooperação entre o setor produtivo e a comunidade acadêmica) e tecnológicos (reversão da fragilidade da infraestrutura de Internet no país).

Dessa forma, o fortalecimento de programas atuais, como por exemplo os da Embrapii e o Edital de Inovação para a Indústria (Senai-Sesi-Sebrae), além da formalização do programa “Agenda Brasileira para a Indústria 4.0”, podem contribuir para o desenvolvimento da inovação na indústria siderúrgica e intensificar o uso das novas tecnologias. Ademais, a maior interface entre as siderúrgicas e as instituições de ensino e pesquisa, em prol de soluções que atendam às necessidades empresariais, pode auxiliar na compreensão destas tecnologias e, conseqüentemente, no melhor aproveitamento em relação à sua aplicação em cada etapa do processo siderúrgico.

Na medida em que estas interações - entre os agentes dos ecossistemas de inovação - se intensificarem, a intensidade de uso destas tecnologias e, por conseguinte, o ritmo de difusão, tendem a aumentar. O desenvolvimento e crescimento dos ecossistemas de tecnologia digital e evolução dos *hardwares* nos próximos anos aumentarão a oferta de desenvolvedores de aplicações específicas, implicando em uma relação comprovação de uso x benefício mais atrativa aos investimentos associados à Indústria 4.0. Além disso, a maior interação com as universidades e centros de pesquisas busca minimizar o risco associado aos projetos de inovação, via implementação de projetos pilotos, proporcionando maior segurança às siderúrgicas em absorver as novas tecnologias em suas plantas produtivas.

Posto isso, a expectativa das siderúrgicas consultadas é que, em 2023, os *Clusters* Inteligência Artificial, *Big Data* e Computação em Nuvem, Produção Inteligente e Conectada e Materiais Avançados apresentem uma difusão moderada no setor siderúrgico, ao passo que a difusão da Internet das Coisas (IoT) e dos Serviços (IoS), Tecnologias de Redes de Comunicação Rápidas e Seguras e Armazenamento e Coleta de Energia seja alta, enquanto a Nanotecnologia ainda apresente uma baixa difusão. O Gráfico 8 sintetiza a percepção predominante acerca da difusão dos *Clusters* Tecnológicos na siderurgia brasileira em dois cenários: atual e daqui a 5 anos (2023)

Gráfico 8 – Ritmo de difusão dos *Clusters* Tecnológicos na siderurgia brasileira



Fonte: Elaboração própria a partir das empresas consultadas.

Nota: As curvas de níveis representam a intensidade do ritmo de difusão, interpretadas do centro para a borda como: muito baixo; baixo; moderado; alto; muito alto.

No tocante ao ritmo de difusão esperado para 2023, os resultados encontrados apresentam algumas divergências em relação à percepção das siderúrgicas quanto ao ritmo de difusão na siderurgia mundial. Enquanto para a siderurgia mundial o ritmo de difusão esperado para Materiais Avançados é baixo, as empresas consultadas esperam um ritmo moderado na siderurgia brasileira. Por sua vez, para os *Clusters* Internet das Coisas e Armazenamento de Energia a difusão esperada na siderurgia mundial é moderada e baixa, embora as siderúrgicas consultadas esperem um ritmo de difusão alto na siderurgia brasileira.

É importante destacar que a amostra utilizada é idêntica ao relatório de De Paula (2017). Embora os resultados encontrados sejam semelhantes no que diz respeito ao ritmo de difusão atual, o mesmo não ocorre para o ritmo de difusão futuro dos *Clusters* Tecnológicos investigados. O curto espaço de tempo entre as pesquisas, um ano de diferença, e a divergência dos resultados, é um forte indicativo do dinamismo e, ao mesmo tempo, da incerteza em relação ao ritmo de difusão das novas tecnológicas na cadeia produtiva do aço.

3.3.2. Estratégias tecnológicas e barreiras à entrada

O desenvolvimento dessas tecnologias e o melhor entendimento em relação às suas aplicações no processo produtivo, tendem a melhorar a eficiência operacional e a produtividade das siderúrgicas. Sua implementação permitirá uma ampla capacidade de processamento e

análise de dados, eliminando eventos redundantes, tarefas ineficientes ou interfaces indesejadas nos processos tradicionais como interfuncionais na cadeia produtiva do aço. Entretanto, tais oportunidades não devem se desenvolver de modo isolado, mas sim disponibilizadas para os concorrentes. Dessa forma, o uso destas tecnologias pode se tornar um fator diferenciador e de competitividade entre as empresas.

Nesse sentido, torna-se imprescindível avaliar os impactos na estrutura produtiva decorrentes das alterações nas barreiras à entrada. Como destacado, os *Clusters Tecnológicos* tendem a melhorar a eficiência operacional e a produtividade das siderúrgicas, entretanto não se vislumbram alterações significativas na escala mínima de produção das plantas produtivas ou de equipamentos específicos. Logo, as novas tecnologias não alteram o tamanho dos fornos e, conseqüentemente, o lote produtivo mínimo. Como afirma uma das empresas consultadas, *“equipamentos com maiores níveis de sensoriamento e automação tendem a se adequarem melhor a níveis de produtividade requeridos”*. Por outro lado, outra siderúrgica acredita que futuramente *“os processos siderúrgicos serão totalmente diferentes, principalmente pela evolução dos processos de fabricação de peças e produtos pela metalurgia do pó associados à processos de impressão (impressão 3D)”*.

A visão predominante é de que os *Clusters Tecnológicos* tendem a favorecer as empresas já estabelecidas, sem alterações substanciais nas barreiras à entrada (Quadro 10). Essa percepção corrobora o grau de maturidade tecnológica da siderurgia, onde as principais barreiras para os entrantes não se encontram somente na tecnologia, mas sim na escala de produção, no volume de capital inicial, nos custos irrecuperáveis e no conhecimento tácito dos processos siderúrgicos. Isto reflete a importância das inovações de processo e produto para a dinâmica tecnológica do setor, as quais têm contribuído para os aperfeiçoamentos dos equipamentos e produtos siderúrgicos nas últimas décadas.

Quadro 10 – Percepção das empresas consultadas quanto aos impactos da Indústria 4.0 nas barreiras à entrada

Siderúrgicas	Barreiras à entrada
Empresa A	Favorecem as empresas inovadoras, independentemente de serem empresas estabelecidas ou novos <i>players</i> .
Empresa B	Favorecem as empresas estabelecidas.
Empresa C	Favorecem a entrada de novos <i>players</i> .
Empresa D	Favorecem as empresas estabelecidas.
Empresa E	Favorecem as empresas inovadoras, independentemente de serem empresas estabelecidas ou novos <i>players</i> .
Empresa F	Favorecem as empresas estabelecidas.

Fonte: Elaboração própria a partir das empresas consultadas.

Embora a instalação de novas plantas produtivas, por parte dos novos entrantes, possa agregar as novas tecnologias, as empresas estabelecidas já concentram dados razoáveis acerca dos processos produtivos e isto acaba sendo um diferenciador competitivo. Esse fato é extremamente relevante quando se trata de qualidade de produto, principalmente em processos complexos (aços ligados/especiais).

Em resumo, apenas uma das seis empresas consultadas destacou que as novas tecnologias tendem a favorecer a entrada de novos concorrentes, mas não apresentou informações que corroborassem o seu argumento. Por sua vez, duas siderúrgicas acreditam que os *Clusters Tecnológicos* tendem a beneficiar as empresas inovadoras, sejam estas estabelecidas ou novos entrantes. Por outro lado, três empresas acreditam que as siderúrgicas estabelecidas sejam as mais favorecidas, no qual uma delas destacou:

Se considerarmos a oportunidade de criação de novas plantas greenfields, elas já poderão vir com estas tecnologias embarcadas e ganharem um diferencial competitivo para alguns aspectos. Mas quando se fala de qualidade de produtos associados às condições de processamento dos mesmos e às condições dos equipamentos, numa planta onde se tem um bom nível de instrumentação, controle e otimização, com histórico dos seus dados e informações, isto pode ser um diferencial competitivo significativo para as plantas já em operação.

Assim, a forma como cada empresa avalia as novas tecnologias e os seus benefícios, acredita nestes e investe, varia conforme seu objetivo estratégico. Na visão de uma das empresas consultadas, as siderúrgicas podem ser classificadas segundo os seguintes perfis tecnológicos:

- i. Inovador: São as empresas que saem à frente no desenvolvimento de novos processos e produtos;
- ii. Seguidor ou *Early Adopter*: São aquelas que seguem os inovadores de imediato;
- iii. Tradicional ou *Late Adopter*: São aquelas que implementam tecnologias já consolidadas;
- iv. Conservador ou *Last Adopter*: São aquelas que implementam as tecnologias quando não possuem outra alternativa.

Desse modo, as estratégias tecnológicas das siderúrgicas, como resposta aos novos desafios, tendem a alterar a distribuição atual das empresas dentro destes perfis, impactando na heterogeneidade entre as firmas. Nesse sentido, as empresas consultadas apresentam visões divergentes em relação à expectativa de ampliação ou não da heterogeneidade, conforme abaixo (Quadro 11).

Quadro 11 – Percepção das empresas consultadas quanto à ampliação da heterogeneidade entre as empresas em função da Indústria 4.0

Siderúrgicas	Heterogeneidade entre as empresas
Empresa A	Amplia a heterogeneidade de modo geral.
Empresa B	Amplia a heterogeneidade de modo geral.
Empresa C	Amplia a heterogeneidade de acordo com o segmento de atuação.
Empresa D	Reduz a heterogeneidade de modo geral.
Empresa E	Amplia a heterogeneidade de modo geral.
Empresa F	Amplia a heterogeneidade entre as siderúrgicas brasileiras e o resto do mundo.

Fonte: Elaboração própria a partir das empresas consultadas.

Para uma das siderúrgica consultadas, a difusão dos *Clusters Tecnológicos* “propiciará menor heterogeneidade, uma vez que as empresas conservadoras serão obrigadas a migrar para o perfil *Late Adpoter* para manter sua competitividade, enquanto as empresas tradicionais migrarão para o perfil *Early Adpoter*”. Por outro lado, para outra siderúrgica, a heterogeneidade “será maior no caso dos produtores de aços especiais em geral e dos

laminados planos revestidos e menor na maior parte dos laminados longos comuns, no qual prevalece a característica de maturidade do produto padrão de inovação na Indústria Siderúrgica Brasileira.” Finalmente, uma companhia destacou que:

O fato dos grandes provedores de tecnologias se encontrarem fora do Brasil e, ao mesmo tempo, estarem realizando associações com programas de governos, fornecedores de equipamentos especializados e clientes finais, somado à iniciativa das grandes siderúrgicas em incorporar unidades específicas voltadas à tecnologia e inovação em suas estruturas produtivas, tendem a aumentar a heterogeneidade entre as siderúrgicas brasileiras e seus concorrentes.

De modo geral, a heterogeneidade entre as firmas é reflexo das diferentes estratégias, que por sua vez, correspondem a diferentes estruturas e aptidões organizacionais, inclusive capacidade em inovar. Desse modo, as siderúrgicas seguirão trajetórias tecnológicas diferentes umas das outras dentro da Indústria 4.0. Aquelas que tiverem aptidão em inovar e obter lucro a partir das inovações serão bem sucedidas em relação ao que seus concorrentes estiverem fazendo e ao rumo dos mercados envolvidos.

Os benefícios esperados com a Indústria 4.0 reforçam a trajetória de inovações incrementais na siderurgia. Isso porque, como demonstrado, as inovações radicais na siderurgia têm sido pouco frequentes, enquanto as inovações de processos e produtos são mais recorrentes. Este fato reflete o grau de maturidade da indústria siderúrgica, no qual os principais equipamentos se encontram num estágio avançado de desenvolvimento. Ademais, mesmo no âmbito das inovações incrementais, a siderurgia tem investido pouco em P&D e este tem sido direcionado para o desenvolvimento de novos produtos, enquanto as inovações de processos tem ficado a cargo dos fornecedores de equipamentos siderúrgicos.

A busca por melhores práticas operacionais, visando ao aumento da produtividade, abre espaço para diversas oportunidades de compartilhamento de conhecimento, sejam associadas a fornecedores, universidades, entidades governamentais, clientes e, até mesmo, com empresas do setor.

A exigência de equipamentos com maior nível de sensoriamento, automação e inteligência artificial tende a reforçar a importância dos fornecedores de equipamentos especializados no setor siderúrgico, embora, assim como em outros setores, parcerias com empresas de tecnologia - “startups” – podem acelerar o uso dos *Clusters Tecnológicos* mencionados, por meio de soluções tecnológicas aderentes ao processo produtivo de cada empresa. Dessa forma, as interações entre os produtores de aço e os fornecedores de equipamentos siderúrgicos tendem a se intensificar, assim como, as interações com os setores

baseados em ciência, como a microeletrônica, e os provedores de conhecimento avançado (*software*, engenharia e consultoria).

O lançamento do Açolab³⁰ é um exemplo de adensamento destas relações. O espaço colaborativo, inaugurado pelo grupo ArcelorMittal, tem como principal objetivo incentivar e acelerar o desenvolvimento de soluções inovadoras, fortalecer o ecossistema de inovação e envolver os clientes e parceiros junto às *startups*.

No que diz respeito às inovações de produto, a maior demanda por aços mais resistentes, leves e recicláveis tende a aumentar o portfólio de produtos siderúrgicos em geral. Assim, a trajetória de enobrecimento nos segmentos de aços ligados/especiais e laminados planos poderá ser aprofundada. Ademais, considerando a complexidade de fabricação desses tipos de aço, o controle mais acurado das especificações químicas e a introdução de Materiais Avançados ampliam as oportunidades de desenvolvimento de aços com características ainda não alcançadas. Para o segmento de planos longos comuns, a expectativa é que com a introdução de novos materiais o *mix* seja ampliado.

As parcerias tecnológicas preponderantes apontam a importância das interações com universidades, fornecedores de tecnologia para siderurgia e fornecedores de tecnologia digital em busca de soluções tecnológicas aderentes à realidade das siderúrgicas brasileiras (Quadro 12). Ademais, este fato demonstra que as siderúrgicas consultadas se preocupam com o que está sendo feito em outros países, mas ainda se mostram inseguras em relação à comprovação do uso x retorno dos projetos.

Além disso, em nenhum dos casos consultados foi constatada a utilização de recursos públicos para implementação de projetos relacionados à Indústria 4.0. Mesmo nos casos em que as companhias reservam recursos próprios a esse fim, não há um plano de investimento previamente definido.

³⁰ O espaço foi inaugurado em julho de 2018, no Vale do Sereno, em Nova Lima (MG). Localizado na região Metropolitana de Belo Horizonte, onde a proliferação de ecossistemas de inovação e empreendedorismo digital é crescente, o Açolab tornou-se uma referência na indústria do aço nacional. O espaço foi projetado com base em outros ecossistemas de inovação, como por exemplo, o Vale do Silício (EUA), e contou com aporte de 30 milhões de reais (ARCELORMITTAL, 2018).

Quadro 12 – Principais parcerias tecnológicas segundo as siderúrgicas consultadas

Siderúrgicas	Parcerias tecnológicas
Empresa A	Parcerias com universidades e instituições privadas de fomento a inovação.
Empresa B	Parcerias com universidades, instituições privadas e públicas de fomento a inovação e fornecedores em geral.
Empresa C	Não informadas.
Empresa D	Parcerias com universidades e fornecedores de tecnologia para siderurgia.
Empresa E	Sem parcerias formais, mas apontou a importância de firmar acordos com universidades/institutos de pesquisa e fornecedores de tecnologia digital.
Empresa F	Parcerias com universidades e fornecedores de tecnologia digital.

Fonte: Elaboração própria a partir das empresas consultadas.

De modo geral, as novas tecnologias tendem a impactar toda a cadeia produtiva de aço, desde a gestão organizacional até a introdução de novos produtos. No que se refere as tecnologias siderúrgicas, os altos investimentos, a estrutura industrial, os custos irrecuperáveis e as altas barreiras à saída tendem a resultar em uma dependência de trajetória tecnológica relativamente alta, que contribui para um considerável lapso de tempo entre inovações, aplicação e disseminação da tecnologia. No entanto, no cenário atual não se vislumbram grandes mudanças tecnológicas na siderurgia, de modo que os *Clusters* Tecnológicos tendem a reforçar as trajetórias tecnológicas vigentes, ou seja, melhoria de processos e enobrecimento de produtos.

Em suma, as inovações da Indústria 4.0 tendem a reforçar as características atuais da siderurgia brasileira. As novas tecnologias abrem infinitas possibilidades para as empresas brasileiras aumentarem sua produtividade, principalmente pelo fato destas tecnologias representarem investimentos relativamente baixos em relação ao padrão tecnológico do setor. Ademais, no cenário atual, os padrões de concorrência e a atual configuração das posições de liderança, bem como as barreiras à entrada no setor siderúrgico brasileiro tendem a permanecer inalteradas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria siderúrgica é um exemplo típico de indústria madura, na qual as inovações radicais têm sido pouco frequentes. Os principais equipamentos siderúrgicos foram desenvolvidos durante os séculos XIX e XX, e encontram-se em estado avançado de desenvolvimento. As inovações recentes consideradas radicais nesta indústria buscam substituir o alto-forno e o laminador de tiras a quente, equipamentos cujo as economias de escalas são preponderantes em uma usina integrada a coque.

Por outro lado, as inovações incrementais têm apresentado maior relevância para o setor, dado seu grau de maturidade tecnológica. As principais inovações incrementais se concentram em melhorias de processos e novos produtos. Por se tratar de um setor tipicamente guiado pela demanda, as siderúrgicas têm concentrado seus esforços no desenvolvimento de novos produtos e direcionado as inovações de processos para os fabricantes de equipamentos siderúrgicos. As interações com esses agentes demonstram uma das principais características da siderurgia, as quais são essenciais para revitalizar a dinâmica tecnológica do setor.

O presente trabalho buscou contribuir para a literatura de inovação e transformação das estruturas produtivas, apresentando as tecnologias da Indústria 4.0 e suas aplicações e implicações para a siderurgia brasileira. Os resultados demonstram que os *Clusters* Tecnológicos da Indústria 4.0 tendem mais a melhorar a eficiência operacional e a produtividade da siderurgia, com inovações de caráter incremental. Além disso, os resultados indicam que as siderúrgicas brasileiras estão preocupadas em implementar as novas tecnologias, mais ainda se mostram inseguras em relação à aplicação dos *Clusters* Tecnológicos e seus benefícios, principalmente por se tratar de um tema recente.

Quanto aos *Clusters* Tecnológicos da Indústria 4.0, ficou evidente que muitas destas tecnologias ainda se encontram em fase de desenvolvimento, enquanto outras já estão sendo aplicadas comercialmente. Para algumas destas tecnologias, sua difusão depende do desenvolvimento de tecnologias oriundas de outros *Clusters* Tecnológicos, como é o caso dos *Clusters* Produção Inteligente e Conectada e Armazenamento e Coleta de Energia. Independente do estágio em que se encontra, o desenvolvimento e difusão da Indústria 4.0 tende a alterar o modelo de produção vigente, mas ainda é cedo para mensurar os verdadeiros impactos nas estruturas produtivas. Os casos analisados mostram resultados animadores, mas até o momento sem alterações relevantes nos modelos de negócios.

Foi analisado o desenvolvimento de aplicações específicas para a siderurgia. Os principais esforços no desenvolvimento destas tecnologias partiram, justamente, dos

fornecedores de equipamentos especializados. Além disso, verificou-se a intenção de adensamento das interações com fornecedores de tecnologias digitais e universidades. De modo geral, as novas tecnologias buscam aumentar o nível de conectividade dentro da indústria e simplificar a complexidade das operações, além de solucionar pontos críticos da siderurgia, como a gestão de manutenção e ativos em geral. As principais vantagens destas tecnologias se traduzem na avaliação inteligente de grandes volumes de dados, apoio à tomada de decisão em relação ao controle de qualidade, controle inteligente da cadeia produtiva através de automação dos processos, reprogramação da produção e de materiais, sistemas de assistência inteligentes, manutenção inteligente, dentre outros. As desvantagens estão, principalmente, ligadas à segurança das informações, tanto na transmissão como no armazenamento de dados.

Assim, foi possível corroborar a hipótese de que os *Clusters* Tecnológicos da Indústria 4.0, em geral, não alteram significativamente as barreiras à entrada na siderurgia brasileira, mas contribuem de forma significativa para elevar a competitividade das empresas desta indústria. Isso pode ser observado pelo fato de que os *Clusters* Tecnológicos tendem a reforçar as trajetórias tecnológicas vigentes na siderurgia, ou seja, as inovações de processos e inovações de produtos. A melhoria de processos tende a permanecer sob a responsabilidade dos fornecedores especializados, enquanto as siderúrgicas tendem a continuar direcionando seus esforços para o enobrecimento de produtos. Isso demonstra que as principais barreiras para os entrantes não se encontram na tecnologia, mas sim nas escalas de produção, no alto investimento inicial, nos custos irre recuperáveis e no conhecimento tácito dos processos siderúrgicos.

Em relação à visão das siderúrgicas quanto à aplicação das novas tecnologias no processo produtivo, estas acreditam que as etapas de redução e refino estão aptas a incorporar um número maior de *Clusters* Tecnológicos. Os resultados demonstram que a etapa de refino do aço é a única fase do processo produtivo que pode se beneficiar de todos os *Clusters* investigados, enquanto a etapa de redução somente não se beneficiaria da Nanotecnologia. Já as aplicações nas etapas de preparação das cargas e laminação estariam concentradas em alguns campos da Indústria 4.0. Ademais, é importante ressaltar que as siderúrgicas vislumbram que os impactos dos *Clusters* Tecnológicos serão mais intensos nas etapas de refino e laminação, dado que o maior controle dos processos nestas etapas pode resultar em reduções de custos, seja relacionados à manutenção preditiva e/ou maior eficiência dos equipamentos e/ou matérias-primas.

Quanto ao ritmo atual de difusão na siderurgia brasileira, as siderúrgicas consultadas acreditam que os *Clusters* Tecnológicos podem ser divididos em três níveis: 1) Muito Baixo: Nanotecnologia; 2) Baixo: Internet das Coisas e dos Serviços, Inteligência Artificial, *Big Data* e Computação em Nuvem, Produção Inteligente e Conectada, Materiais Avançados, e Armazenamento e Coleta de Energia; 3) Moderado: Tecnologia de Redes de Comunicação Rápidas e Seguras. Estes resultados convergem com a visão das empresas siderúrgicas brasileiras acerca do ritmo de difusão atual na siderurgia mundial.

A respeito do ritmo de difusão esperado para 2023, os resultados encontrados apontam para uma divergência entre a percepção das empresas siderúrgicas brasileiras quanto ao ritmo de difusão na siderurgia mundial vis-à-vis na siderurgia brasileira. Enquanto para a siderurgia mundial o ritmo de difusão esperado para Materiais Avançados é baixo, as empresas consultadas esperam um ritmo moderado na siderurgia brasileira. Por sua vez, para os *Clusters* Internet das Coisas e Armazenamento de Energia a difusão esperada na siderurgia mundial é moderada e baixa, embora as siderúrgicas consultadas esperem um ritmo de difusão alto na siderurgia brasileira.

Apesar das siderúrgicas pesquisadas apresentarem opiniões divergentes em relação aos impactos da Indústria 4.0 nas barreiras à entrada no setor siderúrgico brasileiro, constatou-se que a visão predominante é de que as novas tecnologias tendem a favorecer as empresas já estabelecidas, mas sem alterações relevantes nas barreiras à entrada. Mesmo nos casos onde foi considerada a implementação de novas plantas, por parte de potenciais concorrentes, nas quais é possível agregar mais profundamente as novas tecnologias, os resultados se mostraram os mesmos. Este resultado reforça o fato de que, tratando-se de processos siderúrgicos, o conhecimento acumulado também é um importante diferencial competitivo.

Por fim, a visão predominante das empresas consultadas é que a difusão da Indústria 4.0 tende a ampliar a heterogeneidade de modo geral. O hiato tecnológico tende a ser ampliado entre as siderúrgicas, favorecendo, assim, as empresas inovadoras. O fato relevante é que ao considerar a diferença tecnológica entre as siderúrgicas brasileiras e algumas siderúrgicas internacionais, as quais se encontram na fronteira tecnológica, a heterogeneidade tende a ser ampliada substancialmente. Dessa forma, é preciso que as empresas brasileiras estejam engajadas em implementar as tecnologias da Indústria 4.0, de modo a diminuir a ampliação deste hiato e permanecerem competitivas em seus mercados. Para tal, as parcerias tecnológicas tornam-se essenciais.

As principais parcerias tecnológicas apontadas pelas empresas estão sendo firmadas com universidades e fornecedores de tecnologias digitais, com o objetivo principal de encontrar soluções tecnológicas que sejam aderentes à realidade das siderúrgicas brasileiras. Grosso modo, essas relações cumprem o papel de compreender como as novas tecnologias podem melhorar a eficiência dos processos produtivos e dar maior segurança às siderúrgicas na sua implementação. Também foi observado que a falta de um plano nacional que procure esclarecer as diretrizes de desenvolvimento da Indústria 4.0 no Brasil, assim como busque adensar as relações entre os agentes dos sistemas de inovações, é um dos principais fatores que inibem a difusão das novas tecnologias.

Sendo assim, a sugestão para futuros trabalhos é investigar como políticas públicas direcionadas à Indústria 4.0 podem ampliar e dinamizar as parcerias com os sistemas de inovações digitais, de modo a aumentar a difusão destas tecnológicas e garantir que o hiato tecnológico entre as siderúrgicas brasileiras e as internacionais seja diminuído. Também se pode buscar entender, de forma mais profunda, a importância das parcerias com universidades e centros de pesquisas no desenvolvimento de aplicações específicas da Indústria 4.0 para a siderurgia brasileira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADJOGBLE, F. *Big River Steel: the world's first learning steel mill*. SMS Group GmbH, 2018.

ALACERO – Asociación Latinoamericana Del Acero. Aplicaciones específicas de la manufactura digital en la industria del acero. *Revista Acero LatinoAmericano*, n. 567, marzo-abril, 2018.

BASSON, E. *Changing structures in the world and EU steel. Eurometal world steel distribution & SSS summit*. Düsseldorf: Eurometal, 2017.

BELL, M.; PAVITT, K. *Technological Accumulation and Industrial Growth: Contrast Between Developed and Developing Countries*, in *Industrial and Corporate Change*, v. 2, n. 2, p. 157-210, 1993. <https://doi.org/10.1093/icc/2.2.157>

CÁRIO, S. A. F. Contribuição do paradigma micro dinâmico neo-schumpeteriano à teoria econômica contemporânea. *Textos de Economia*, v. 6, n. 1, p. 155-170, 1995.

CASTELLACCI, F. Technological paradigms, regimes and trajectories: Manufacturing and service industries in a new taxonomy of sectoral patterns of innovation. *Research Policy*, v. 39, p. 1139-1158, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.03.011>

CGEE. *Siderurgia no Brasil 2010-2025*; subsídios para tomada de decisão – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.

CONCEIÇÃO, O. A. C. A centralidade do conceito de inovação tecnológica no processo de mudança estrutural. *Ensaio FEE*, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 58-76, 2000.

DE PAULA, G. M. *Setor Aços Longos Comuns (Vergalhões)*. Relatório Final. Rio de Janeiro: Estudos Setoriais da Indústria Brasileira de Materiais de Construção, 1996.

DE PAULA, G. M. *Privatização e estrutura de mercado na indústria siderúrgica mundial*. Rio de Janeiro, Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (Tese de Doutorado), 1998.

DE PAULA, G. M. Desenvolvimento tecnológico, alianças estratégicas e apoio governamental: o caso Tecnored. *Anais do XXVII Encontro da ANPAD*. Atibaia: Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração – ANPAD, 2003.

DE PAULA, G. M. *Economia de Baixo Carbono: Avaliação de Impactos de Restrições e Perspectivas Tecnológicas – Siderurgia*. Relatório Final. Ribeirão Preto: EBC – Núcleo de Estudos em Economia de Baixo Carbono, 2012.

DE PAULA, G. M. Nota Técnica do Sistema Produtivo Insumos Básicos e Foco Setorial Siderurgia. *Relatório do Projeto Indústria 2027: Riscos e Oportunidades para o Brasil Diante de Inovações Disruptivas*. Rio de Janeiro: IE-UFRJ; Campinas: IE-UNICAMP, 2017.

DOSI, G. Technological Paradigms and Technological Trajectories: A suggestive interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research Policy*, v. 11, p. 147-162, 1982. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(82\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0048-7333(82)90016-6)

DOSI, G. Sources, Procedures and Microeconomic Effects of Innovation. *Journal of Economic Literature*, vol. XXVI, Sept 1988.

DOSI, G. *Mudança técnica e transformação industrial: a teoria e uma aplicação à indústria dos semicondutores*. Tradução de Carlos D. Szlak. Campinas, São Paulo: Editora da Unicamp, 2006.

FERREIRA, C. G. *Os traços principais da evolução das normas técnicas de produção na siderurgia*. Texto para discussão Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional/Universidade Federal de Minas Gerais, n 54. Belo Horizonte: CEDEPLAR/UFMG, 1989.

FERREIRA, C. G. A evolução das normas técnicas de produção na siderurgia: principais tendências históricas. *Nova Economia*. Belo Horizonte: FACE-UFMG, v.3, n.1, setembro, p. 225-246, 1993.

FERREIRA, J. A. S. *Transferência de tecnologia na produção de aços planos especiais: o caso da Acesita*. Rio de Janeiro, Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (Dissertação de Mestrado), 1997.

FURTADO, M. A. T *et alii*. A gestão de pesquisa e desenvolvimento em empresas siderúrgicas privatizadas. *Revista de Administração*, v. 35, n. 1, p. 51-62, 2000.

GUILHOTO, J. J. M; SESSO FILHO, U. A. Estimação da Matriz Insumo-Produto a Partir de Dados Preliminares das Contas Nacionais. *Economia Aplicada*. Vol. 9. N. 2. Abril-Junho. pp. 277-299, 2005.

GUILHOTO, J. J. M; SESSO FILHO, U. A. Estimação da Matriz Insumo-Produto Utilizando Dados Preliminares das Contas Nacionais: Aplicação e Análise de Indicadores Econômicos para o Brasil em 2005. *Economia & Tecnologia*. UFPR/TECPAR. Ano 6, Vol 23, Out./Dez, 2010.

GUILHOTO, J. J. M. *Sistema de Matrizes de Insumo-Produto, Brasil (1995-2013)*. NEREUS - Núcleo de Economia Regional e Urbana da USP, 2016.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. Working Paper No. 01/2015, Technische Universität Dortmund – Fakultät Maschinenbau, Audi Stiftungslehrstuhl Supply Net Order Management, 2015.

HOLLEIS, G. Global trends in the iron and steel industry. *La Revue de Métallurgie – CIT*, janvier, p. 145-160, 1994.

IABr. *Importância Estratégica do Aço na Economia Brasileira*. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2011.

IABr. *Anuário Estatístico (vários anos)*. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2018a.

IABr. *Mercado Brasileiro do Aço*. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2018b.

IBGE. *Sistema de Contas Nacionais – Matriz de Insumo Produto: Brasil 2005/2009*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2007.

IBGE. *Sistema de Contas Nacionais – Matriz de Insumo Produto: Brasil 2010*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2016a.

IBGE. *Sistema de Contas Nacionais – Indicadores de Volume e Valores Correntes*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2016b.

IEC. *Factory of the future*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2015.

IEDI. *Indústria 4.0: A quarta Revolução Industrial e os desafios para a indústria e para o desenvolvimento brasileiro*. São Paulo: Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial (IEDI), 2017.

IEDI. *Estratégias Nacionais para a Indústria 4.0*. São Paulo: Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial (IEDI), 2018a.

IEDI. *Princípios de um Plano para a Indústria 4.0 no Brasil*. São Paulo: Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial (IEDI), 2018b.

IEL/NC. *Mapa de clusters tecnológicos e tecnologias relevantes para competitividade de sistemas produtivos*. Brasília, DF: Instituto Euvaldo Lodi, Núcleo Central, 2017.

JP MORGAN. Iron Ore: Chinese steel production remains at record levels, while policy support could see improved 2H18 activity. Global Equity Research. São Paulo: JP Morgan, 2018.

KUPFER, D. Uma abordagem neo-schumpeteriana da competitividade industrial. *Ensaio FEE*, v. 17, n. 1, p. 355-372, 1996.

MACDOUGALL, W. *INDUSTRIE 4.0 Smart Manufacturing for the Future*. Germany Trade & Invest, Berlin, 2014.

MALERBA, F. Sectoral System of Innovation and Production. *Research Policy*, v. 31, p. 247–264, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00139-1](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00139-1)

MALERBA, F. Sectoral Systems and Innovation and Technology Policy. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 2, n. 2, p. 329-375, 2003. <https://doi.org/10.20396/rbi.v2i2.8648876>

MALERBA, F. Sectoral systems: how and why innovation differs across sectors. In: FAGERBERG, J; MOWERY, D. C; NELSON, R. R. (Eds) *The Oxford handbook of innovation*. Oxford: Oxford University Press, p. 380-406, 2005.

MELLO LOPES, M. P. A indústria brasileira do aço: Situação atual e perspectivas. 28º Congresso Brasileiro do Aço. Brasília: Instituto Aço Brasil (IABr), 2017.

MIDREX. 2017 World Direct Reduction Statistics. North Carolina: Midrex, 2018.

MORANDI, A. A siderurgia e sua adaptação ao novo paradigma tecnológico. *Análise Econômica*, n. 28, p. 5-34, 1997.

MPT INTERNATIONAL. Big River Steel's flat steel complex on its way to become a learning steel mill. *Mettallurgical Plant and Technology (MPT – International)*, v. 6, p. 41-45, 2017.

MTE – MINISTÉRIO DO TRABALHO. Relação anual de informações sociais. Disponível em: <<http://bi.mte.gov.br/bgcaged/rais.php>>. Acesso em: 26 jan. 2019.

NELSON, R. R. Why do firms differ, and how does it matter. *Strategic Management Journal*, v. 12, p. 61-74, Winter 1991. Special issue. <https://doi.org/10.1002/smj.4250121006>

NOLDIN JÚNIOR, J. H. An Overview of the New and Emergent Ironmaking Technologies. *IAS 8th Ironmaking Conference*. Rosario: Instituto Argentino de Siderurgia (IAS), 2011.

NOLDIN JÚNIOR., J. H. Big River Steel. *Revista ABM*, v.72, n. 645, p.56-57, 2017.

NOLDIN JÚNIOR, J. H. Descarbonização na siderurgia. *Revista ABM*, v. 74, n. 650, p. 34-35, 2018.

NICOLAU, J. A.; PARANHOS, J. Notas sobre o conceito de inovação. *Textos de Economia*, v. 9, n. 1, p. 23-27, Jan/Jun 2006.

PAVITT, K. Sectorial patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory. *Research Policy*, North-Holland, n. 13, 1984.

PETERS, H. *et al. Roadmap of integrated intelligent manufacturing in steel industry*. Brussels: European Steel Technology Platform (ESTEP), 2016.

PETERS, H. *How could Industry 4.0 transform the steel industry?* Future Steel Forum. Warsaw: Steel Times International, 2017.

PINHO, M. *Reestruturação produtiva e inserção internacional da siderurgia brasileira*. Campinas, Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas (Tese de Doutorado), 2001.

PINHO, M.; LOPES, A. L. *Limites e possibilidades do Brasil nas configurações produtivas globalizadas: a cadeia siderúrgica*. Relatório de pesquisa do projeto “Limites e possibilidades do Brasil nas configurações produtivas globalizadas”. Convênio GEEIN-UNESP/IPEA. São Carlos: DEP/UFSCar, 2000.

PINKHAM, M. Digital Technologies increase momentum. *Metal Market Magazine*, June, p. 59-67, 2018.

PWC. *Industry 4.0: Building the digital enterprise*. Metal key findings. Munich: PricewaterhouseCoopers (PWC), 2016a.

PWC. *Industry 4.0: Building the digital enterprise*. Munich: PricewaterhouseCoopers (PWC), 2016b.

SILVA, F.; A. DE CARVALHO. *Research and development, innovation and productivity growth in the steel sector*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2016.

SOARES, R. C. O desenvolvimento tecnológico e gerencial como fator de aumento de produtividade. *Metalurgia-ABM*, v. 45, n. 384, p. 1129-1142, 1989.

SCHUMPETER, J. (1961). *Capitalismo, Socialismo e Democracia*. (Editado por George Allen e Unwin Ltd., traduzido por Ruy Jungmann). — Rio de Janeiro: Editora Fundo de Cultura.

TEECE, D.; PISANO, G. The dynamic capabilities of firms: an introduction. *Industrial and Corporate Change*, v. 3, p. 537-556, 1994. <https://doi.org/10.1093/icc/3.3.537-a>

TEECE, D. J. “A dynamic capabilities-based entrepreneurial theory of the multinational enterprise”. *Journal of International Business Studies*, v. 45, p. 8–37, 2013. <https://doi.org/10.1057/jibs.2013.54>

UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Population Prospect: The 2017 Revision*, World Population 2017 Wallchart. ST/ESA/SER.A/398, 2017.

WINTER, G.; KURKA, G.; ANKERMANN, K.; BINDER, A.; RINGHOFER, M. *The digital transformation of steel production*. Primetals Technologies Austria, 2018.

WSA. *Steel Statistical Yearbook (vários anos)*. Brussels: World Steel Association, 2018a.

WSA. *World Steel In Figures 2018*. Brussels: World Steel Association, 2018b.

WSA. *Short range outlook October 2018*. Brussels: World Steel Association, 2018c.

YUAN, C. Comunicação e tecnologias de mãos dadas. *Revista ABM*, v. 74, n. 650, p. 56-58, 2018.

ANEXO 1

QUESTIONÁRIO APLICADO ÀS EMPRESAS

1. Qual o ritmo de difusão das seguintes tecnologias na siderurgia brasileira no contexto atual?

1.1. Internet das Coisas e dos Serviços: sistemas, equipamentos e componentes

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

1.2. Tecnologia de redes de comunicação rápidas e seguras

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

1.3. Inteligência Artificial, *Big Data* e Computação em Nuvem

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

1.4. Produção Inteligente e Conectada

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

1.5. Materiais Avançados

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

1.6. Nanotecnologia

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

1.7. Armazenamento e Coleta de energia

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

2. Qual o ritmo de difusão das seguintes tecnologias na siderurgia brasileira em 2023?

2.1. Internet das Coisas e dos Serviços: sistemas, equipamentos e componentes

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

2.2. Tecnologia de redes de comunicação rápidas e seguras

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

2.3. Inteligência Artificial, *Big Data* e Computação em Nuvem

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

2.4. Produção Inteligente e Conectada

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

2.5. Materiais Avançados

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

2.6. Nanotecnologia

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

2.7. Armazenamento e Coleta de energia

☐ Muito Baixo ☐ Baixo ☐ Médio ☐ Alto ☐ Muito Alto

3. Considerando as tecnologias apontadas anteriormente, qual a aplicação nas seguintes etapas do processo produtivo?

3.1. Preparação de carga:

3.2. Redução:

3.3. Refino:

3.4. Laminação:

4. Como a empresa avalia a intensidade de uso das seguintes tecnologias na sua planta produtiva?

4.1. Internet das coisas e dos Serviços:
sistemas, equipamentos e
componentes

<input type="checkbox"/>	Não usa
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 2 anos
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 5 anos
<input type="checkbox"/>	Média
<input type="checkbox"/>	Alta
<input type="checkbox"/>	Muito Alta

4.2. Tecnologia de redes de comunicação
rápidas e seguras

<input type="checkbox"/>	Não usa
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 2 anos
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 5 anos
<input type="checkbox"/>	Média
<input type="checkbox"/>	Alta
<input type="checkbox"/>	Muito Alta

4.3. Inteligência artificial, *Big data* e
Computação em Nuvem

<input type="checkbox"/>	Não usa
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 2 anos
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 5 anos
<input type="checkbox"/>	Média
<input type="checkbox"/>	Alta
<input type="checkbox"/>	Muito Alta

4.4. Produção Inteligente e Conectada

<input type="checkbox"/>	Não usa
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 2 anos
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 5 anos
<input type="checkbox"/>	Média
<input type="checkbox"/>	Alta
<input type="checkbox"/>	Muito Alta

4.5. Materiais avançados

<input type="checkbox"/>	Não usa
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 2 anos
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 5 anos
<input type="checkbox"/>	Média
<input type="checkbox"/>	Alta
<input type="checkbox"/>	Muito Alta

4.6. Nanotecnologia

<input type="checkbox"/>	Não usa
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 2 anos
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 5 anos
<input type="checkbox"/>	Média
<input type="checkbox"/>	Alta
<input type="checkbox"/>	Muito Alta

4.7. Armazenamento e Coleta de energia

<input type="checkbox"/>	Não usa
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 2 anos
<input type="checkbox"/>	Não usa, mas usará em 5 anos
<input type="checkbox"/>	Média
<input type="checkbox"/>	Alta
<input type="checkbox"/>	Muito Alta

5. O uso das novas tecnologias propicia ampliação ou redução da heterogeneidade entre as empresas siderúrgicas no mundo e no Brasil?
6. Quais os benefícios (gestão organizacional, redução de custos, qualidade do produto, novos produtos,) gerados pela incorporação dessas tecnologias?
7. A incorporação dessas tecnologias possibilita reduzir a escala mínima de produção da planta (na sua totalidade) ou de equipamentos específicos?
8. As novas tecnologias permitem ganhos de produtividade no processo produtivo? Caso sim, em quais etapas? Comente em ordem decrescente de intensidade.
9. Considerando as questões anteriores, a difusão dessas tecnologias favorecem as empresas já atuantes ou facilita a entrada de novos concorrentes?
10. Quais as principais barreiras técnicas e/ou econômicas (e suas respectivas intensidades) para implementação e difusão dessas tecnologias?
11. Como a empresa avalia a relação benefício x barreiras no contexto atual? E daqui a 5 anos?
12. A implementação dessas tecnologias altera o *mix* de produção? Se sim, em qual direção? E qual a intensidade?
13. A incorporação dessas tecnologias aumenta ou não altera o grau de interação organizacional entre as etapas do processo produtivo? Se aumenta, quais as etapas beneficiadas? Se não altera, quais as principais barreiras?
14. Como o tema vem sendo discutido no grupo/empresa? Existe um comitê específico que trata sobre o assunto? Qual sua abrangência?
15. Considerando o caráter multidisciplinar dessas tecnologias, a empresa discute o tema de forma centralizada ou segmentada?

- 16. Atualmente o grupo/empresa disponibiliza orçamento para implementação dessas tecnologias? Caso sim, qual o percentual da receita líquida?**
- 17. O grupo/empresa utiliza recursos públicos para implementar os projetos de modernização ligados a Indústria 4.0? Caso utilize, qual a fonte dos recursos e qual a importância desses recursos para os projetos?**
- 18. A empresa tem parcerias com fornecedores, universidades ou institutos de pesquisa para absorção e difusão dessas tecnologias? Caso existam parcerias, cite exemplos e a importância destas para os projetos.**
- 19. Qual o impacto dessas tecnologias na mão de obra empregada e na sua qualificação?**