

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E DE PETRÓLEO**

**RENATA RAMOS DE SOUZA
THAYANNE DE CASSIA RODRIGUES ERNESTO**

**A INDÚSTRIA 4.0 E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA
PRODUÇÃO DE ETANOL NO BRASIL**

**Niterói
1/2020**

**RENATA RAMOS DE SOUZA
THAYANNE DE CASSIA RODRIGUES ERNESTO**

**A INDÚSTRIA 4.0 E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA
PRODUÇÃO DE ETANOL NO BRASIL**

Projeto Final apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Química, oferecido pelo Departamento de Engenharia Química e de Petróleo da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Química.

ORIENTADOR

Prof. Dr. Geraldo de Souza Ferreira

**Niterói
1/2020**

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S719i Souza, Renata Ramos de
A INDÚSTRIA 4.0 E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE
ETANOL NO BRASIL / Renata Ramos de Souza, Thayanne de Cassia
Rodrigues Ernesto ; Geraldo de Souza Ferreira, orientador.
Niterói, 2020.
85 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Química)-Universidade Federal Fluminense, Escola de
Engenharia, Niterói, 2020.

1. Industria 4.0. 2. Produção energética. 3. Etanol. 4.
Sustentabilidade. 5. Produção intelectual. I. Ernesto,
Thayanne de Cassia Rodrigues. II. Ferreira, Geraldo de Souza,
orientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de
Engenharia. IV. Título.

CDD -

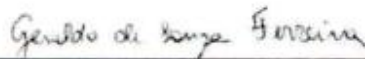
**RENATA RAMOS DE SOUZA
THAYANNE DE CASSIA RODRIGUES ERNESTO**

**A INDUSTRIA 4.0 E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA
PRODUÇÃO DE ETANOL NO BRASIL**

Projeto Final apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Química, oferecido pelo Departamento de Engenharia Química e de Petróleo da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovada em 17 de agosto de 2020.

BANCA EXAMINADORA

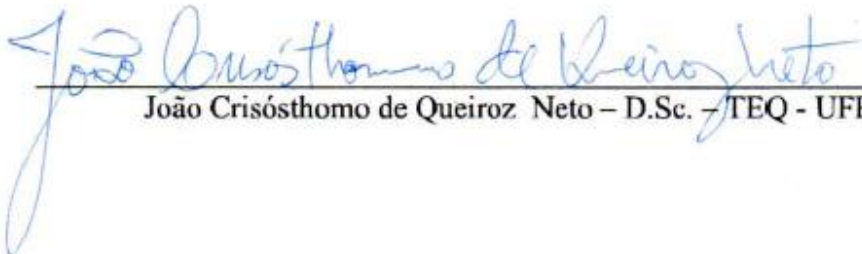


Geraldo de Souza Ferreira, D.Sc. – TEQ-UFF

Presidente da Banca - Orientador



João Felipe Mitre de Araujo, D.Sc. – TEQ-UFF



João Crisóstomo de Queiroz Neto – D.Sc. – TEQ - UFF

**Niterói
1/2020**

Dedicamos este trabalho às nossas famílias

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, todo meu agradecimento e admiração aos meus pais, Rosângela e Luiz Cláudio. Tenho muito orgulho de vocês e da nossa família.

Para meus sobrinhos Arthur, Carolina e Igor: que vocês encontrem este meu trabalho, que tenham acesso à educação de qualidade e que se realizem nas suas conquistas. Obrigada à minha irmã Pollyana: também me orgulho muito de você.

À Camila: agradeço por estar lado a lado comigo, pelos ensinamentos, incentivo, amor e companheirismo.

Universidade Federal Fluminense (UFF), Instituto Federal Fluminense de Cabo Frio (IFF) e escolas municipais por onde passei: obrigada pela educação pública, gratuita e de qualidade. Agradeço aos professores que fizeram a diferença na minha trajetória – em especial ao professor Palhares, pelo incentivo e inspiração para seguir na engenharia. Obrigada também ao professor Geraldo, pela orientação no trabalho.

E agradeço aos meus amigos: vocês tornaram o percurso mais leve.

Thayanne Ernesto

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir realizar o meu sonho de me tornar Engenheira Química.

Aos meus pais e familiares pelo apoio incondicional, sem os quais nada disso seria possível. Agradeço também aos meus irmãos e sobrinhos por entenderem os meus momentos de ausência e não medirem esforços para me ajudar sempre que precisei.

Aos meus amigos, Anelise, Barcellos e Carina, que estavam presentes nos estudos e demais momentos importantes do dia a dia em todos esses anos.

Ao meu companheiro, Breno, pela amizade, paciência e parceria nos momentos difíceis que surgiram ao longo do curso e para a realização deste trabalho.

E, em especial, ao meu filho(a), que mesmo antes de nascer já me motiva e incentiva a me tornar uma pessoa melhor e a lutar para conquistar meus objetivos.

Por fim, agradeço a Universidade Federal Fluminense (UFF), pela formação e aos professores que contribuíram para o meu desenvolvimento. Agradeço, também, ao meu orientador, pela contribuição na realização do trabalho.

Renata Souza

RESUMO

Após as três anteriores, a 4ª Revolução Industrial se desenvolve no cenário mundial tendo em vista máquinas e componentes inteligentes, permitindo a integração entre pessoas, produtos e sistemas. Além de novas ferramentas, a expectativa é de que o seu desenvolvimento contribua para ganhos em eficiência, menor custo em manutenção e redução do consumo de energia. A digitalização traz a possibilidade de uma produção com menor impacto ambiental, uma vez que a otimização dos processos industriais tende reduzir as emissões de CO₂ e aumentar a eficiência energética. Como oportunidades para a Indústria Química, entre outros pontos, cita-se o incentivo ao desenvolvimento sustentável dos demais setores e o uso de energia a partir de fontes renováveis. Devido à importância da energia renovável na matriz energética brasileira, a geração de energia pela biomassa da cana-de-açúcar é considerada como assunto central. Do ponto de vista construído neste trabalho, a produção do etanol é avaliada diante das possibilidades de eficiência energética da sua própria produção, através da implementação de tecnologias 4.0 e redução do uso de fontes fósseis no seu ciclo produtivo. Dito isso, o estudo da cadeia produtiva do biocombustível está associado a dois grandes âmbitos: o agrônomo e o industrial. Nota-se que as atividades do primeiro grupo são responsáveis por 79% do consumo de energia não renovável empregada na produção do álcool. Conseqüentemente, esse setor é o mais significativo em termos de influência na eficiência energética total, seguido pelo industrial, com 18% do consumo de energia não renovável. A disparidade no consumo de fontes fósseis é evidente e seu reflexo pode ser claramente observado na P&D (Pesquisa e Desenvolvimento): a maioria das soluções 4.0 difundidas no cenário brasileiro estão sendo direcionadas para o âmbito agrônomo, o de maior consumo fóssil.

Palavras-chaves: Indústria 4.0, Sustentabilidade, Eficiência Energética, Energia Renovável, Cana-de-Açúcar, Etanol.

ABSTRACT

After the previous three, the 4th Industrial Revolution is developing worldwide through intelligent machines and components, with the purpose of allowing integration between people, products and systems. In addition to new tools, the expectation is that its development will contribute to efficiency gains, lower maintenance costs and reduced energy consumption. The process of digitalization brings the possibility of decreasing the environmental impact of production, since the optimization of industrial processes tends to reduce CO₂ emissions and increase energy efficiency. As opportunities for the Chemical Industry, this dissertation mentions the incentive for the sustainable development of other sectors and the use of energy from renewable sources. Given the importance of renewable energy in the Brazilian energy matrix, energy production from sugarcane biomass is considered a central topic. From the perspective constructed in this work, the ethanol production is analyzed based on the possibilities of boosting energy efficiency in its own production by implementing 4.0 technologies and reducing the use of fossil sources throughout the process. That being said, the study of the production chain of biofuels is associated with two major areas: agronomic and industrial. It should be noted that the activities of the first group are responsible for 79% of the consumption of non-renewable energy used in the production of alcohol. For this reason, this sector is the most significant in terms of influence over the total energy efficiency, followed by the industrial sector with 18% of non-renewable energy consumption. The difference in consumption of fossil sources are evident, and its repercussions on R&D (Research and Development) can be easily observed: most of the 4.0 solutions disseminated in Brazil target the agronomic sector, which shows the greatest fossil consumption.

Key words: Industry 4.0; Sustainability; Energy Efficiency; Renewable Energy; Sugarcane; Ethanol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Esquema de Funcionamento da Economia Circular, p 35

Figura 3.2 – Ações Necessárias para Implementação de Eficiência Energética no Brasil, p 39

Figura 3.3 – Matriz Energética Brasileira, p 40

Figura 3.4 – Participação das Renováveis na OIE Brasileira, p 41

Figura 4.1 – Produção Nacional de Etanol Anidro e Hidratado, p 45

Figura 4.2 – Evolução da Produção de Etanol Total a partir da Cana-de-Açúcar, p 45

Figura 4.3 - Fluxograma Básico do Processo de Produção de Etanol, p 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais Marcos Históricos da Sustentabilidade, p 31

Tabela 5.1 – Consumo de Recursos Não Renováveis na Produção de Etanol, p 55

Tabela 5.2 – Consumo de Energia Não Renovável na Produção de Etanol, p 56

Tabela 5.3 – Eficiência Energética do Etanol para Diferentes Matérias-Primas, p 58

Tabela 5.4 – Principais Atividades da Extração da Matéria-Prima e as Entradas Não Renováveis, p 60

Tabela 5.5 – Síntese das Principais Soluções da 4.0 no Âmbito Agrônomico e Oportunidades de Ganhos em Eficiência Energética, p 63

Tabela 5.6 – Principais Atividades da Etapa de Produção (Usina) e as Entradas Não Renováveis, p 64

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AMP	Advanced Manufacturing Partership – Parceria de fabricação avançada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ATR	Açúcar Total Recuperável
AUV	Autonomous Underwater Vehicles - Veículos Subaquáticos Autônomos
B	Boro
BCG	Boston Consulting Group
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BSA	Business Software Alliance- aliança de software de negócios
Ca	Cálcio
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CH₃CH₂OH	Álcool etílico
CH₄	Metano
Cl	Cloro
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CO	Monóxido de Carbono

CO₂	Dióxido de Carbono
CO₂eq	CO ₂ e outros gases com efeito de aquecimento global equivalente ao CO ₂
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CPS	Sistema Ciberfísico
Cu	Cobre
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENGEMA	Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo
Fe	Ferro
FIEP	Federação das Indústrias do Estado do Paraná
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
FoF	Factories of The Future – Fábricas do Futuro
GEE	Gases do Efeito Estufa
GTI	Grupo de Trabalho para a Indústria
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
IAA	Instituto do Açúcar e do Alcool
IAC	Instituto Agrônômico
IEDI	Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial
IEDI	Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial
IoT	Internet of Things – Internet das Coisas
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

K	Potássio
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDIC	Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
Mg	Magnésio
MIT	Massachusetts Institute of Technology
N	Nitrogênio
NIST	Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia
NOx	Óxidos de Nitrogênio
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OIE	Oferta Interna de Energia
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Fósforo
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PIB	Produto Interno Bruto
PPP	Public-Private Partnership- Parceria public privada
RA	Realidade Aumentada
RFID	Radio Frequency Identification- Identificação por Rádio Frequência
RV	Realidade Virtual
S	Enxofre
SOx	Óxidos de Enxofre
TI	Tecnologia da Informação
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
ZARC	Zoneamento Agrícola de Risco Climático

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	INTRODUÇÃO	13
1.1.	Objetivo	13
1.2.	Estrutura do Trabalho	14
1.3.	Método de pesquisa	14
CAPÍTULO II	O CONTEXTO DA QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL E PERSPECTIVAS PARA A INDÚSTRIA QUÍMICA	16
2.1.	As Revoluções Industriais	16
2.2.	A Indústria 4.0	17
2.2.1.	Princípios Fundamentais	18
2.2.2.	Tecnologias e Ferramentas	19
2.3.	O Brasil no Contexto da Indústria 4.0	28
2.3.1.	O Mercado de Trabalho na Indústria 4.0	29
2.4.	Indústria Química Brasileira: Perspectivas para Sustentabilidade e Geração de Energia Renovável	30
CAPÍTULO III	A INDÚSTRIA 4.0 E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	33
3.1.	Conceito de Sustentabilidade	33
3.1.1.	Pilares da Sustentabilidade	34
3.2.	A Sustentabilidade e a Indústria	35
3.2.1.	Conceitos Ligados à Sustentabilidade – Economia Circular	36
3.2.2.	Políticas de Estímulo à Inovação Sustentável	38
3.2.3.	Impactos da Utilização de Fontes de Energia não Renováveis	39
3.3.	Eficiência Energética	39
3.4.	Matriz Energética Brasileira e Potencial Geração de Energia Renovável	42
CAPÍTULO IV	A PRODUÇÃO DO ETANOL E SEUS DESAFIOS	44
4.1.	Geração de Energia pela Biomassa e os Biocombustíveis	44
4.2.	Produção do Etanol Brasileiro a partir da Cana de Açúcar	46

4.3. Etapas de Produção do Etanol	47
4.3.1. Extração da Matéria Prima	48
4.3.2. Produção (Usina)	50
4.4. Desafios Tecnológicos para a Produção de Etanol	55
CAPÍTULO V ANÁLISE DA PRODUÇÃO DO ETANOL BRASILEIRO DIANTE DA INDÚSTRIA 4.0 E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	57
5.1. Uso de Energia Fóssil na Produção de Etanol e seu Impacto na Eficiência Energética	57
5.2. A Quarta Revolução no Setor Sucroenergético	61
5.2.1. Âmbito Agrônomo: Produção da Matéria-Prima e Soluções 4.0	61
5.2.2. Âmbito Industrial: Produção de Etanol e Soluções 4.0	66
CAPÍTULO VI CONCLUSÃO	69
6.1. Conclusões	69
6.2. Sugestão de Trabalhos Futuros	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

CAPÍTULO I INTRODUÇÃO

Segundo Tertuliano (2019), a Indústria 4.0 se apresenta como uma maneira de conectar os meios digitais com os processos físicos, sendo um caminho para integração total entre o que é considerado cotidiano e a tecnologia. O ambiente acadêmico vem buscando preparar os alunos cada vez mais para o mercado de trabalho, que será diretamente afetado.

Dessa forma, dentro do curso de graduação em engenharia química, um dos temas que chamou a atenção das autoras foi como a Indústria 4.0 poderia ser aplicada para otimizar os processos industriais, sendo um ponto de partida para o aprofundamento teórico abordado neste trabalho – relacionando suas aplicabilidades para possibilitar o desenvolvimento sustentável.

Diante do cenário mundial atual, a sustentabilidade se tornou foco em muitas discussões e, com isso, a necessidade de uma matriz energética menos dependente de combustíveis fósseis é cada vez mais evidente. Sendo assim, o conteúdo deste documento orientou-se pela geração de energia renovável, mais especificamente, sobre o potencial de aplicação das ferramentas da indústria 4.0 para a geração eficiente do etanol, de modo a ter um duplo retorno pelo caráter renovável e pela oportunidade de maior eficiência energética da produção.

Os biocombustíveis, inclusive o etanol, surgem como alternativas para redução de emissão dos gases responsáveis pelo efeito estufa e, por esse motivo, a sua produção se tornou temas de estudos e pesquisas. No Brasil, o conceito de digitalização das usinas ainda é recente, mas acredita-se que as novas tecnologias podem contribuir positivamente para a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar.

Do ponto de vista do biocombustível, as inovações podem proporcionar novas perspectivas – rotas de produção e equipamentos diferentes dos que já são utilizados – e potencialmente complementar a cadeia produtiva.

1.1. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo realizar um levantamento bibliográfico na literatura existente sobre os temas: Indústria 4.0, Desenvolvimento Sustentável e Eficiência Energética da Produção de Etanol; avaliar como já vem sendo aplicada as ferramentas da indústria 4.0 na produção de energia no mundo e discorrer sobre a redução dos impactos ambientais com a

utilização de tecnologias inovadoras; além disso, apresentar um resumo de como o Brasil está acompanhando o processo da quarta revolução industrial e o que se pode esperar para o futuro.

Portanto, é feito um aprofundamento na geração de energia renovável pela biomassa de cana-de-açúcar, propondo a utilização das ferramentas da indústria 4.0 para a maior eficiência energética do ciclo produtivo e, dessa forma, servir de parâmetro teórico inicial para posteriores trabalhos sobre o tema.

1.2. Estrutura do Trabalho

O capítulo 1 deste Trabalho de Conclusão de Curso aborda uma breve introdução ao conteúdo tratado nos capítulos seguintes, fazendo uma discussão sucinta a respeito do tema abordado.

O capítulo 2 analisa de forma detalhada a Indústria 4.0, apresentando seus conceitos e ferramentas, além de uma discussão sobre a situação do Brasil e as indústrias químicas nesse contexto.

O capítulo 3 apresenta um panorama a respeito da sustentabilidade, seus principais conceitos e as expectativas para o desenvolvimento sustentável. Aborda também sobre a eficiência energética brasileira.

O capítulo 4 constrói um estudo sobre a produção do etanol a partir da cana-de-açúcar. Explicitando as principais etapas do ciclo produtivo e os desafios tecnológicos do setor.

O capítulo 5 descreve os resultados, a produção de etanol é observada do ponto de vista da eficiência energética, segundo o potencial de aplicação das ferramentas 4.0.

O capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho.

1.3. Método de pesquisa

O trabalho disserta sobre a aplicação da Indústria 4.0 na geração de energia e, por consequente, como o uso dessas técnicas vem contribuindo para um modelo mais eficiente e sustentável da indústria. Para isso, será realizada uma revisão bibliográfica sobre os assuntos abordados, correlacionando-os com materiais disponíveis na literatura, inovações e descobertas da academia.

O referencial está dividido em seções para separar melhor o conteúdo e facilitar o entendimento dos leitores. Foi utilizado o método de pesquisa observacional, com finalidade em uma pesquisa básica sobre o tema.

Serão apresentados conceitos que foram base e referencial teórico para a realização do trabalho. Primeiramente, para realização da pesquisa foram definidas as palavras-chave e suas combinações possíveis, como: Indústria 4.0, quarta revolução industrial, sustentabilidade e Indústria 4.0, energia renovável, eficiência energética e por último, etanol e cana-de-açúcar. Foram utilizados como critérios de inclusão artigos de revisão sobre os temas, buscando abranger uma maior amplitude de assuntos relacionados ao tema do trabalho.

Foram pesquisadas bases de dados das seguintes instituições brasileiras: IPEA, BNDES, CAPES, CNI, FIRJAN, EMBRAPA, MCTIC e ABDI; além de artigos que serão citados no corpo do texto.

Após a busca dos documentos, foi realizada uma análise qualitativa para avaliar se estavam de acordo com o tema – selecionando os que contemplavam melhor o assunto. Em seguida, foi decidido que seria realizado um resumo de caráter informativo e imparcial a respeito das publicações, apresentando os dados reunidos pela pesquisa bibliográfica.

CAPÍTULO II O CONTEXTO DA QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL E PERSPECTIVAS PARA A INDÚSTRIA QUÍMICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos e ferramentas da Quarta Revolução Industrial, além das perspectivas para a Indústria Química brasileira no que se refere às oportunidades de sustentabilidade e geração de energia renovável.

2.1. As Revoluções Industriais

Partindo de um breve histórico sobre as revoluções industriais, entre os anos de 1760 e 1840, iniciou-se a Primeira Revolução Industrial na Grã-Bretanha, com exploração do carvão como energia alternativa à madeira e outros biocombustíveis, além da transformação de energia em força mecânica, através de caldeiras e máquinas a vapor (COELHO, 2016).

Impulsionada pelo uso de eletricidade na produção em massa, ocorreu uma transição entre 1840 e 1870 para a Segunda Revolução Industrial – também conhecida como revolução tecnológica –, iniciando-se nos EUA, na Inglaterra e na Alemanha. Fase marcada pelo desenvolvimento tecnológico do Japão e pela produção em série implementada por Henry Ford até a década de 1910 (MOKYR; STROTZ, 1998).

Com as duas revoluções anteriores, chega-se à Terceira – a revolução digital. A tecnologia analógica se modifica para a digital, quando circuitos integrados aumentam a capacidade computacional. Neste sentido, observa-se o início da Era da Informação, transformando as formas de comunicação através da internet e do comércio eletrônico (SABO, 2015).

Após as três últimas revoluções industriais, tem-se a 4ª Revolução Industrial, com a introdução do programa *Industrie 4.0*¹, propondo a integração entre máquinas inteligentes e componentes inteligentes. Traduzido como Indústria 4.0, o conceito tornou-se publicamente conhecido em 2011, quando uma iniciativa alemã visava promover a competitividade da indústria manufatureira no país (KAGERMANN et al,² 2011 apud HERMANN et al, 2015).

¹Termo tratado na Alemanha como uma marca e, por essa razão, não é traduzido em alguns artigos. Pode ser entendido como a proposta de uma 4ª Revolução Industrial, ou mesmo a implantação de “indústrias inteligentes”, ou “manufatura inteligente” (RODRIGUES *et al.*, 2016, p. 36).

² KAGERMANN, H., W. Lukas and W. Wahlster, 2011: Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. VDI nachrichten, 13.

O governo, por sua vez, vinculou o projeto como parte integrante da sua estratégia de alta tecnologia para a Alemanha 2020, a iniciativa “*High-Tech Strategy 2020 for Germany*” que buscava a liderança em inovação tecnológica (KAGERMANN et al,³ 2013 apud HERMANN et al, 2015).

No mesmo ano, os Estados Unidos anunciaram o “*Report to the President on Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing*” em conjunto com o “*Advanced Manufacturing Partnership (AMP)*” para revitalização da indústria e fortalecimento da manufatura avançada (Indústria 4.0) – apoiando-se nas indústrias, universidades e o governo federal. A proposta era um maior investimento em tecnologias emergentes, com mão de obra qualificada e aumento da competitividade global (FIRJAN, 2016).

Posteriormente, em 2013, a União Europeia divulgou o “*Factories of The Future (FoF) Public-Private Partnership (PPP)*”, uma iniciativa voltada para aumentar a base tecnológica industrial, através do desenvolvimento e integração de tecnologias facilitadoras (FIRJAN, 2016).

Em 2015, a China iniciou o “*Made in China 2025*” como estratégia para atualizar a indústria do país, baseando-se em: construção de centros de inovação em fabricação; fortalecimento da indústria de base; fabricação verde; projetos de fabricação inteligentes; e projetos de inovações disruptivas em equipamentos (FIRJAN, 2016).

2.2. A Indústria 4.0

A 4ª Revolução Industrial, assim como as três anteriores, é marcada pelas diversas mudanças na manufatura, operações, design, produto e sistemas de produção. Ao contrário das demais, esta não é analisada a posteriori, seus acontecimentos são previstos e observados como tendências (FIRJAN, 2016).

O “4.0” sugere a quarta versão, onde os aspectos virtuais e físicos se correlacionam através da internet, ou seja: fornecedores, distribuidores, unidades e produto tornam-se conectados digitalmente, o que proporciona a integração da cadeia de valor (FIRJAN, 2016).

Segundo Anderl (2014), Indústria 4.0 se traduz como uma abordagem estratégica para a associação de avançados sistemas de controle com tecnologia de internet, permitindo a

³ KAGERMANN, H., W. Wahlster and J. Helbig, eds., 2013: Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group.

comunicação entre produtos, sistemas e pessoas. Nesse sentido, Brettel et al. (2014) acrescenta que a atual revolução industrial será desencadeada pela internet, que viabiliza o diálogo entre seres humanos e máquinas em um Sistema Ciberfísico (CPS).

Sobre sua implementação, por se tratar de um processo de transição, os componentes da Indústria 4.0 podem variar de acordo com os diversos autores. Em comum, alguns pesquisadores defendem, atualmente, uma divisão entre princípios e tecnologias fundamentais associados à sua concretização.

2.2.1. Princípios Fundamentais

Baseando-se em uma revisão da literatura, Hermann, Pentek e Otto (2015) relatam que a 4ª Revolução Industrial parte de seis princípios para sua fundamentação e viabilização, sendo eles: interoperabilidade, virtualização, descentralização, capacidade em tempo real, orientação a serviços e modularização.

A partir disso, é estabelecida a integração dos sistemas digital e físico, onde os seis princípios são empregados ao longo da cadeia produtiva. Ainda que essas redes possam trabalhar separadamente, nesse contexto elas atuam de forma associada, a fim de integrar todas as etapas e fases de desenvolvimento do processo – através da digitalização e automação (ANASTASIA, 2015).

Segue uma breve explicação sobre cada um dos princípios:

- **Interoperabilidade:** característica dos sistemas e organizações que trabalham em conjunto (interoperando), onde organizações, pessoas e sistemas computacionais interagem para trocar informações de maneira eficaz e eficiente.

Nesse sentido, mesmo que descendentes de diferentes fornecedores, os diversos componentes que compõem a Indústria 4.0 – como softwares, processos, pessoas e equipamentos – estabelecem uma comunicação entre si (ANASTASIA, 2015).

- **Virtualização:** criação de um ambiente virtual que simula o ambiente real. Assim, sugere-se a existência de uma cópia virtual das fabricas através do monitoramento com sensores, modelos virtuais e simulação computacional (ANASTASIA, 2015).

- **Descentralização:** o sistema de máquinas, além de receber informações, passa a ter autonomia para controlar e fornecer as mesmas, em tempo real e com base na análise de dados.

Com isso, dispositivos tornam-se capazes de acompanhar a operação para respostas rápidas, baseando-se nas informações processadas por esses sistemas – o que reduz a dependência da ação humana e descentraliza o controle da operação (I-SCOOP, 2017; ANASTASIA, 2015).

- **Capacidade em tempo real:** possibilidade de respostas mais assertivas através do monitoramento da produção em tempo real (ANASTASIA, 2015).
- **Orientação a serviços:** aplicações que monitoram e controlam dispositivos, tornando o processo inteligente. Como resultado, a customização da produção e operação permite maior flexibilidade de adaptação de acordo com as especificações dos clientes (FIRJAN, 2016).
- **Modularização:** flexibilidade de modificação de tarefas por meio de módulos da produção. A autonomia de cada módulo reflete na descentralização, onde, de acordo com a demanda ou individualidade do produto, tais módulos podem ser adicionados, retirados ou substituídos na estrutura inicial.

Dessa forma, o processo torna-se passível de alterações com mais eficiência, menos perdas e de acordo com a demanda (I-SCOOP, 2017; ANASTASIA, 2015).

2.2.2. Tecnologias e Ferramentas

Um estudo do *Boston Consulting Group* (BCG, 2015) define nove principais tecnologias que colaboram para a Indústria 4.0, sendo elas: Robôs Autônomos, Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada, Simulação, Sistemas de Integração Horizontal e Vertical, Internet das Coisas (IoT), Computação em Nuvem, Cibersegurança e *Big Data and Analytics*.

Embora muitas já existam e sejam utilizadas, a discussão levantada é de que, ao invés de serem aplicadas pontualmente, essas atuem de forma descentralizada e segundo os princípios mencionados anteriormente (MOURA, 2018).

2.2.2.1. Internet das Coisas (IoT)

O conceito de Internet das Coisas, um dos mais citados no cenário da 4.0, não está intrinsecamente relacionado a uma tecnologia, no entanto, desempenha uma série de funcionalidades através dessa. Por esse motivo, diversas ferramentas estão associadas ao termo, sejam as que se referem à conexão física dos objetos ou de infraestrutura básica (FACCIONI FILHO, 2016).

O Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial (IEDI, 2017) define IoT como o meio digital por onde as versões virtuais de sistemas inteligentes se comunicam, citando inclusive o crescente número de objetos conectados à Internet (*Smart Objects*). Esse conceito está relacionado com a tendência de conectar componentes que podem desempenhar atividades como coleta de informações, monitoramento e troca de dados, através de redes de comunicação, (com ou sem fio) e sem a necessidade constante da presença do ser humano (SEIXAS; CONTINI, 2017).

De acordo com Minerva, Biru e Rotondi (2015, p. 07-08), a história de desenvolvimento da IoT iniciou-se com a tecnologia RFID, Identificação por Rádio Frequência, – do inglês *Radio Frequency Identification* – utilizada desde a Segunda Guerra Mundial como forma de identificar a natureza dos aviões no radar (se aliados ou adversários).

Em 1999, no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) e no centro de estudos *AutoID Center*, David Brock e Sanjay Sarma estudaram a difusão desses sistemas através de etiquetas de RFID com microchips de baixo custo. Desse projeto, nasceu a proposta de conectar as etiquetas com a internet (MINERVA; BIRU; ROTONDI, 2015). A utilização do RFID e conexões com a internet, fomenta o que foi denominado “Internet das Coisas”. Todavia, a expressão “*Internet of Things*” foi usada pela primeira vez somente em 2002, na revista *Forbes Magazine*, e pelo pesquisador do *Auto-ID Center*, Kevin Ashton (FACCIONI FILHO, 2016).

Como exemplo dessa ferramenta, Seixas e Contini (2017) citam os sensores, drones, satélites, entre outros objetos conectados que são capazes de coletar e enviar informações em uma plantação, seja sobre a umidade, solo, condições climáticas, monitoramento de ar, etc. – o que permite a chamada agricultura de precisão (plantio de precisão, aplicação de fertilizantes, pulverização, irrigação).

No que se refere aos princípios básicos, destaca-se a **interoperabilidade** como o mais relevante no contexto da IoT, uma vez que a ferramenta garante a interação entre sistemas, independente da função (IEDI, 2017).

2.2.2.2. Big Data and Analytics

Como consequência de novos modelos sociais, econômicos e tecnológicos, a modificação do uso e tratamento da informação pela sociedade nas últimas décadas torna-se bastante evidente. Heath e Bizer (2011) reforçam que estamos rodeados por uma vasta quantidade de dados. São registros sobre: produção de bens e serviços, investimentos governamentais, estatísticas da economia e dados sobre consumo, por exemplo.

Uma pesquisa realizada pela *Business Software Alliance* (BSA, 2015) estimou que cerca de 2,5 quintilhões (10^{18}) de *bytes* em dados são gerados diariamente, número que será duplicado a cada dois anos. Um imenso conjunto de dados denominado *Big Data*.

Tal conceito refere-se à coleção de dados, sendo um fator essencial para a atual revolução industrial, uma vez que a tomada de decisões e a promoção de conhecimento são viabilizadas através desse. Por esse motivo, novos processos estão sendo desenvolvidos para otimizar o *Big Data*, já que os bancos de dados tradicionais não possuem capacidade de obter, armazenar e interpretar as informações em tempo real (INTEL, 2013).

Esse processamento acelerado também é fundamental para o *Machine Learning*, aprendizado de máquina em português, outro agente característico da quarta revolução industrial (BACCARIN, 2018). O *Machine Learning* pode ser entendido como uma de análise de dados que automatiza a construção de modelos analíticos. O *Statistical Analysis System* (SAS, 2020) acrescenta: “é um ramo da inteligência artificial baseado na ideia de que sistemas podem aprender com dados, identificar padrões e tomar decisões com o mínimo de intervenção humana”.

Ao processar um fluxo de dados em tempo real, as organizações podem tomar decisões com mais agilidade, acompanhar as recentes tendências, reparar equívocos rapidamente e investir em novos negócios (BACCARIN, 2018).

Big Data and Analytics, segundo INTEL (2012): “é uma estratégia de tecnologia habilitada para deixar a percepção mais rica, profunda e precisa no que se refere a clientes, analisando padrões e correlações”.

Os princípios mais relevantes ao analisar o *Big Data and Analytics* são (IEDI, 2017): **virtualização**: com as adequadas ferramentas de análise, os dados provenientes da virtualização dos processos físicos tornam-se valiosos para a implantação e manutenção da Indústria 4.0; e **capacidade de resposta em tempo real**: análise dos dados mais ágil para uma maior eficiência e qualidade, possibilitando a tomada de decisão no contexto das fábricas inteligentes.

2.2.2.3. Computação em Nuvem

Embora possa ter sido referenciada anteriormente, a expressão “computação em nuvem” foi empregada pela primeira vez em 2006 por Eric Schmidt, *Chief Executive Officer* (CEO) do Google, a fim de mencionar a computação empregando recursos da Internet (Aymerich et al,⁴ 2008 apud CHAVES, 2011).

A definição desse conceito não é imediata, estando normalmente influenciada pela área de aplicação. Corrêa e Visoli (2011, p. 11) explicam que o termo:

“[...] se adapta a diversos nichos, de forma que fornecedores de hospedagem de serviços definem de uma forma mais voltada aos seus objetivos, enquanto departamentos de Tecnologia da Informação (TI) definem, sem enfatizar a comercialização de serviços, as capacidades que uma nuvem pode fornecer para o ambiente de TI.” (CORRÊA; VISOLI, 2011, p.11).

Pela necessidade de uma definição mais formal, o *National Institute of Standards and Technology* (NIST) define a computação em nuvem como sendo:

“ [...] um modelo para permitir acesso via rede, conveniente e sob demanda, a um conjunto de recursos computacionais configuráveis e compartilhados (como redes, servidores, armazenamento, aplicações e serviços) que podem ser rapidamente provisionados e liberados com o mínimo de esforço de gerenciamento e interação de com o provedor do serviço” (CORRÊA; VISOLI, 2011, p.11).

Em outras palavras, o conceito se baseia na transferência de dados e realização de processos computacionais externos à empresa, seguido da recuperação destes por meio da internet (IEDI, 2017).

Estudos do IEDI (2017) afirmam que servidores externos são de grande importância computacional, pois possuem alta capacidade de armazenamento e possibilitam que a segurança

⁴ AYMERICH, Francesco Maria et al. An approach to a Cloud Computing network. In: Proceedings of the 1st International Conference on the Applications of Digital Information and Web Technologies (ICADIWT). Washington, DC (US): IEEE Computer Society, p. 113-118, Ago, 2008.

dos dados seja superior aos presentes em empresas – especialmente de pequeno e médio porte –, sendo uma prática comum do mercado disponibilizá-los como serviços.

No contexto de Indústria 4.0, essa ferramenta é essencial para garantir a **Descentralização** e a **Capacidade de Resposta em Tempo Real**. Pois permite que os CPS tenham acesso a um grande poder computacional, sem impactar negativamente nas suas dimensões, custos, ou estrutura da fábrica inteligente; além de viabilizar a evolução dos protocolos de comunicação e processadores externos, deixando-o mais velozes para tomada de decisões mais eficientes (IEDI, 2017).

Ao utilizar soluções para gerenciamento e processamento de dados com uso de computação em nuvem, o ambiente agro passa a ter acesso a informações relevantes de forma ágil, acessíveis de qualquer lugar, permitindo a comunicação entre usina e campo, monitoramento da plantação à distância e em tempo real, por exemplo.

2.2.2.4. Manufatura Aditiva

Giordano, Zancu e Rodrigues (2016) explicam que o termo Manufatura Aditiva se refere a tecnologias utilizadas na fabricação de objetos físicos através de fontes de dados criadas em sistemas de projetos computacionais. Além disso, ressaltam que tais equipamentos não se restringem somente à produção de modelos, mas também à manufatura final de produtos.

Ou seja, o conceito está relacionado aos processos produtivos que, diferentemente dos métodos tradicionais de fabricação, partem de um material para reproduzir uma geometria virtual em um objeto físico. Como por exemplo, a Impressão 3D (IEDI, 2017).

Na Indústria 4.0, esse tipo de processo adiciona flexibilidade à produção, garantindo a customização. Ademais, relata-se uma maior liberdade de forma para o produto, reduzindo o desperdício de material e o tempo de produção em pequena escala. Logo, grande parte da aplicação está relacionada à fabricação rápida de protótipos e em algumas indústrias específicas como a aeronáutica, na manufatura de componentes complexos (IEDI, 2017).

Nesse sentido, os princípios mais importantes relacionados à manufatura aditiva são a **Interoperabilidade** – uma vez que produção de componentes é viabilizada em quaisquer equipamentos que recebam sua versão digital; a **Orientação ao Serviço**, por facilitar a adequação do processo de produção como um serviço prestado no contexto de fábrica inteligente via rede digital; e a **Modularidade**, em virtude da grande flexibilidade ao produzir os componentes sem alteração do arranjo físico do equipamento (IEDI, 2017).

2.2.2.5. Realidade Aumentada

Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA) são dois conceitos distintos relacionados à integração entre usuários e sistemas computacionais, onde ambos precisam de um intermediário (aplicativo ou acessório).

A RV propõe uma interface avançada e independe de componentes do mundo real, possibilitando o uso de aplicações como computadores, óculos de realidade virtual, entre outros. Já a RA se baseia na mistura entre componentes reais e virtuais, conectando esses dois ambientes (KIRNER; SISCOOTTO, 2007).

Em outras palavras, Kirner (2006) explica que: a RV traz o usuário para o ambiente virtual; por outro lado, a RA permite que o usuário permaneça no seu ambiente físico e transporta o ambiente virtual até o mesmo, possibilitando a interação com o mundo virtual de forma mais natural.

Essa tecnologia pode ser utilizada para incluir operadores humanos em uma fábrica inteligente, por exemplo. Com dados e modelos já disponíveis sobre diversos processos via IoT, equipamentos de RA proporcionam informações importantes na execução de processos (PEDERNEIRAS, 2018).

Dentro do cenário brasileiro, a FIRJAN desenvolveu um aplicativo que simula procedimentos de inspeção e manutenção industrial. A visualização é possibilitada por meio de um *tablet*, que, ao ser apontado para o equipamento, reconhece sua atividade. Com isso, informações de banco de dados do equipamento, última manutenção realizada, manual, entre outras interações podem ser obtidas (NETO RIBEIRO, 2018).

No agronegócio, com um aplicativo de smartphone o produtor poderá identificar pragas e doenças, inclusive acompanhar o balanço nutricional da plantação. Isso porque os sensores de presença de pragas já são utilizados atualmente e ficam acoplados nos maquinários, produzindo as informações que chegam até os celulares.

No contexto industrial, a RA possibilita a redução de tempo de produção e manutenção de equipamentos, direcionando os processos industriais para o mundo digital e mesclando as duas realidades – o que destaca o papel dos princípios de **Virtualização e Capacidade em Tempo Real** no cenário da Indústria 4.0 (IEDI, 2017).

2.2.2.6. Cibersegurança

A Confederação Nacional de Indústria explica que o aumento da conectividade em produtos e serviços influencia diretamente na vulnerabilidade desses sistemas, levando-se em consideração a incidência de ataques cibernéticos. Além de comprometer dados na área de TI, as interferências também podem atingir o mundo físico, estendendo os riscos para ambientes e pessoas. Por essa razão, é imprescindível um sistema protegido e confiável para acompanhar o desenvolvimento tecnológico, integrado e autônomo da Indústria 4.0 (CNI DIGITAL, 2018).

Devido à necessidade do uso da rede para a integração da planta industrial, a cibersegurança é fundamental desde a comunicação entre os processos, no qual os dados são transmitidos dos sistemas (sensores e atuadores), até ao nível de negócio (ferramentas de *Business Intelligence*) (CNI DIGITAL, 2018).

Em suma, Chhetri et al. (2018,⁵ apud LOUREIRO; VERÍSSIMO, 2018) esclarecem que:

“[...] uma planta industrial deve conter ferramentas em seus sistemas de segurança que sejam capazes de detectar riscos, proteger a infraestrutura da rede, identificar eventos incomuns, reagir à ataques e promover a recuperação do sistema caso este tenha sido hackeado” (CHHETRI et al., 2018 apud LOUREIRO; VERÍSSIMO, 2018).

2.2.2.7. Robôs Autônomos

Visando a maior automação dos processos, o uso de robôs autônomos também é citado como uma das ferramentas no cenário da Indústria 4.0. No contexto da atual revolução, essa tecnologia possui a capacidade de aumentar significativamente a produtividade, além de otimizar as operações industriais em conjunto com o trabalho humano (CNI DIGITAL, 2017).

No caso da indústria de óleo e gás, a utilização de robôs (em específico um AUV, *Autonomous Underwater Vehicles*) pode reduzir o uso de mergulhadores em operações de risco elevado, além de mapear zonas de exploração em águas profundas com maior segurança e precisão. Neste caso, as principais atividades seriam: manutenção, inspeção e reparo dos equipamentos (SANTOS, 2016).

Uma pesquisa do IEDI (2018) aponta que a indústria automotiva correspondia a faixa de 40% a 45% do uso anual de robôs entre 2010 e 2015, seguida pelos setores de computadores

⁵ CHHETRI, S.; RASHID, N.; FAEZI, S.; FARUQUE, M. Security trends and advances in manufacturing systems in the era of industry 4.0. In: IEEE/ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER-AIDED DESIGN (ICCAD). Proceedings of 3th International Conference on computer-aided design. 2017.

e equipamentos eletrônicos (15%), equipamentos elétricos, eletrodomésticos e componentes (entre 5% e 10%), além dos produtos químicos, de plástico e de borracha, e do setor de máquinas industriais.

2.2.2.8. Integração Horizontal e Vertical dos Sistemas

O conceito de “Integração Horizontal e Vertical” descreve como os processos, produtos, dados e sistemas de produção se relacionam. Apesar da maioria dos sistemas de TI não estar totalmente integrada, para a Indústria 4.0 o processo produtivo precisa buscar a integralização dos seus componentes, dada a variabilidade de produtos, processos e a flexibilidade da produção (CNI DIGITAL, 2017).

Nesse sentido, a integração vertical permite a atuação de sistemas de TI nos diferentes níveis hierárquicos da indústria, a fim de gerar uma organização automatizada. Uma das características dessa integração é a personificação da manufatura ou possibilidade de um serviço customizado, de acordo com as determinações do cliente. Portanto, sua essência está relacionada ao uso de sensores e CPS que viabilizam respostas ágeis nas diversas situações e variáveis (ANASTASIA, 2015).

Assim, a integração vertical requer a digitalização de diferentes níveis da indústria, resumidos em cinco setores principais: chão de fábrica, com atuadores e sensores que possibilitam a interface com o processo de manufatura; controle, responsável pelo acompanhamento de máquinas e sistemas; produção, caracterizado pelo monitoramento, controle e supervisão de processos; operação, entendido como o planejamento da produção, gerenciamento da qualidade e eficiência dos equipamentos; e, por último, planejamento corporativo, responsável pelo gerenciamento e processamento dos pedidos e pelo planejamento geral da produção (I-SCOOP, 2017).

Por outro lado, a integração horizontal refere-se a conexão entre as atividades internas e as partes interessadas de uma organização (*stakeholder*), podendo inclusive conectar outras empresas no âmbito nacional e internacional. Assim como na vertical, a integração horizontal também utiliza CPS, que atua em diversos pontos – logística, manufatura, armazenagem, marketing e vendas (DELOITTE, 2015).

Com isso, toda cadeia produtiva passa a estar vinculada às especificações do cliente, como pedido, desenvolvimento, composição e distribuição dos produtos. Logo, fatores como

tempo, risco, qualidade, preço e sustentabilidade são prospectados de forma dinâmica e em tempo real (DELOITTE, 2015).

2.2.2.9. Simulação

A modelagem computacional de uma planta industrial ou operação acontece por meio da simulação. Através dessa, o processo de manufatura é reproduzido virtualmente, levando ao conceito de *Digital Twin* (gêmeo digital). Esses modelos digitalizados permitem a identificação prévia de falhas, maior controle da cadeia produtiva e mais qualidade dos produtos (NETO RIBEIRO, 2018).

Sendo assim, o uso de simulação computacional permite que dados em tempo real sejam utilizados para espelhar o mundo físico em um modelo virtual – incluindo máquinas, produtos e humanos.

A partir de resultados simulados, os atuadores modificam as operações para respostas do mundo físico, o que gera variáveis e dados no mundo virtual. Com isso, o sistema constrói uma base de dados capaz de prever e acompanhar os processos e operações (DELOITTE, 2017).

A utilização de softwares de simulação para prototipagem virtual é um dos principais pontos da Indústria 4.0, uma vez que as técnicas modulares de simulação e modelagem permitem que as unidades descentralizadas alterem de forma flexível os produtos.

A Ambev, como um caso prático, relata sobre o uso de softwares simuladores para promover a otimização das cervejarias, o que garante a produção da quantidade correta de cerveja para atender o mercado e, com isso, reduz ao mínimo possível o uso de recursos como água e energia elétrica (CNI, 2017).

Neto Ribeiro (2018) explica que esta ferramenta está bastante relacionada com a Realidade Aumentada, podendo ser utilizada em diversos procedimentos como: planejamento e otimização de processos, prototipagem, montagem e desmontagem de componentes, treinamento, operação remota, etc.

2.3. O Brasil no Contexto da Indústria 4.0

Dados sobre Inovação e Tecnologia mostram que o Brasil estava na 64^a posição no ranking das economias com maiores capacidades e sucesso de inovação em 2018 e caiu para 66^a em 2019, segundo o Índice Global de Inovação (2019). Resultados do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC, 2019) mostram que, em 2017, gastos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) eram de R\$ 82,8 milhões, 1,26% comparado ao Produto Interno Bruto (PIB) – países como Alemanha atingiram 3,04%, enquanto o Japão 3,21% e a Coreia 4,55%.

Sobre a digitalização da indústria, o CNI (2016) reforça que 48% da indústria nacional utiliza tecnologias digitais. Do ponto de vista da região fluminense, por exemplo, 51% da indústria estadual dispõe de tecnologias digitais. Todavia, ressalta-se que, nessa mesma região, 98% das empresas são pequenas e médias, onde o potencial para sobreviver à crise e disponibilidade econômica para atualização do parque fabril são reduzidos quando comparados às grandes empresas (FIRJAN; FINEP, 2019).

A indústria de transformação brasileira passou de 34% do PIB, na década de 1980, para 11%, em 2015. Com isso, o país acabou especializando-se em *commodities* e serviços de baixo valor agregado, atuando principalmente como fornecedor de matérias-primas e produtos agrícolas primários. No entanto, mais de 50% das receitas do comércio internacional deriva de produtos manufaturados (FIRJAN; FINEP, 2019).

Dito isso, a Quarta Revolução Industrial chegou no Brasil praticamente pelas matrizes das fábricas que trouxeram os conceitos e máquinas. Exemplo disso são as fábricas da Fiat em Betim e Mercedes-Benz, que já utilizam realidade virtual, robôs colaborativos e aprendizagem de máquina. As indústrias de base, como petróleo, celulose e química, também são pioneiras na utilização de tecnologias avançadas (FIRJAN; FINEP, 2019). Entre 2016 e 2018, o CNI (2016b) apontou um aumento significativo do número de fábricas que aderiram ao uso de tecnologias digitais, consideradas pertencentes à Indústria 4.0, passando de 63% para 73% em grandes companhias.

A premissa é de que a inserção de novas tecnologias, na estratégia do desenvolvimento da Indústria 4.0 brasileira, será importante para a competitividade nacional e maior participação nas cadeias globais de valor, isso porque haveria mais espaço para o uso eficiente dos recursos (físicos, financeiros e informacionais) – o que resultaria em produtos e serviços mais competitivos (CNI, 2016a).

Segundo levantamento da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2017), a estimativa de redução nos custos industriais no Brasil, a partir da mudança da indústria para o conceito 4.0, será de aproximadamente R\$ 73 bilhões/ano. Essa economia envolve ganhos de eficiência (R\$ 34 bilhões/ano), redução nos custos de manutenção de máquinas (31 bilhões/ano) e consumo de energia (R\$ 7 bilhões/ano).

Além disso, em outro ponto evidenciado pela ABDI (2017), a Indústria 4.0 também traz a possibilidade de uma produção com menor impacto ambiental, uma vez que a otimização dos processos industriais pode levar à redução das emissões de CO₂, por exemplo. O estudo destaca ainda que é possível monitorar de forma pontual cada parte do processo produtivo, o que resultaria em uma produção mais sustentável, controlada e com menos gastos – indicando que o consumo elevado de recursos naturais tende a cair.

Neste sentido, o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC, 2018) instituiu, em junho de 2017, o Grupo de Trabalho para a Indústria 4.0 (GTI 4.0), na proposta da elaboração de uma agenda nacional. O GTI 4.0 conta com diversas instituições representativas (governo, empresas, sociedade civil organizada) e sustenta-se a partir de contribuições e debates sobre diferentes perspectivas, além de ações para a Indústria 4.0 no Brasil. Com isso, cita-se a Agenda Brasileira para a Indústria 4.0, uma parceria entre MDIC e ABDI, onde as medidas contempladas vão desde a difusão de informações sobre este novo cenário até a disponibilização de linhas crédito para que mais indústrias possam investir na geração ou adoção das tecnologias 4.0.

Sobretudo, como vem ocorrendo em outros países, a disseminação das tecnologias da Indústria 4.0 no Brasil não alcançará todos os setores ao mesmo tempo e da mesma forma. Diante do nível de heterogeneidade da indústria brasileira, é interessante que as políticas sejam adaptadas para os diferentes setores e conjuntos de empresas, os quais assumirão velocidades e condições distintas (CNI, 2016a).

2.3.1. O Mercado de Trabalho na Indústria 4.0

Como visto anteriormente, a Indústria 4.0 é baseada no desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas nos processos produtivos, trazendo maior eficiência e produtividade através da digitalização das atividades industriais. Sendo assim, sua implantação envolve desafios que vão desde pesquisas até os impactos sociais que podem surgir.

A economia brasileira precisa se adaptar para implantar e acompanhar a quarta revolução industrial. Novas tecnologias e digitalização dos processos levam a uma mudança no perfil profissional, para minimizar os possíveis efeitos negativos como desempregos é necessária uma preparação (CNI, 2016).

Junto com a mudanças trazidas pela Indústria 4.0 para as empresas também se observa a necessidade de um perfil profissional mais preparado, pois as empresas passarão a trabalhar com equipes multidisciplinares e não apenas com o especialista em cada área. Nesse sentido, cabe ao profissional se atualizar e capacitar para atender as mudanças na economia (GONÇALVES, 2018). Além disso, é fundamental incentivos por partes do governo em relação à Pesquisa e Inovação, estimulando a educação profissional multidisciplinar.

Para o profissional de Engenharia Química não é diferente, a palavra-chave é multidisciplinaridade, o profissional deve se capacitar em áreas diferentes e, com isso, complementar sua formação.

2.4. Indústria Química Brasileira: Perspectivas para Sustentabilidade e Geração de Energia Renovável

Um estudo publicado em 2018 pela Associação Brasileira da Indústria Química (Abiquim) em parceria com a Deloitte ressalta sobre o papel do Indústria Química no fomento de soluções avançadas – citando inclusive o termo “Química 4.0”, em alusão ao desenvolvimento do setor frente à Indústria 4.0.

A indústria química é responsável por 10% do PIB da indústria no Brasil, sendo a oitava maior indústria química do mundo e tornando-se o terceiro maior segmento na manufatura do país. Além de estar presente na produção de insumos para outras áreas, essa é uma etapa importante na agregação de valor da cadeia produtiva, uma vez que a complexidade tecnológica aumenta a partir da exploração e produção, seguindo pelo refino até o consumo (ABIQUIM; DELOITTE, 2018).

Dito isso, o setor químico é identificado como o segundo que mais dinamiza a economia e, por isso, apresenta um grande potencial no cenário brasileiro de desenvolvimento da Indústria 4.0. Considerando de antemão as usuais ferramentas de automação e sistemas de informação mais robustos, uma consultoria Mckinsey (2017) reforça ainda que existem três principais formas das novas tecnologias digitais influenciarem a indústria química:

- **Aumento de desempenho nos processos de manufatura, vendas e marketing, pesquisa e desenvolvimento:** a análise de dados possibilita maiores rendimentos, menor consumo de energia e manutenção mais efetiva. A aplicação em duas grandes indústrias químicas resultou em 10% de aumento na produção (sem investimento em capital), redução de 25% no consumo de vapor de alta pressão e diminuição de 26% no consumo de energia. Em questões de P&D, os benefícios foram identificados pelo desenvolvimento de novas especialidades químicas com valor agregado, simulação de experimentos e capacidade preditiva no desenvolvimento de formulações.
- **Mudanças nos clientes:** setores que dependem da indústria química também estão passando por modificações em seus processos. Na agricultura, por exemplo, têm-se utilizado cada vez mais imagens por satélite, dados geológicos, meteorológicos, geoespaciais e informações sobre sementes, fertilizantes e defensivos agrícolas, com isso, tende-se a um maior controle na aplicação de pesticidas e fertilizantes. Ou seja, a redução na demanda por químicos agrícolas deve ser considerada. Em outro caso, a migração do comércio para plataformas online impacta diretamente na fabricação de embalagens. No âmbito da impressão 3D as oportunidades são ampliadas para o mercado de termoplásticos de alta performance e aditivos para impressão.
- **Modelo de negócios atrelado ao desempenho:** o conhecimento sobre o desempenho do produto enquanto este é utilizado proporciona novos modelos de negócios – citando-se catalisadores ou compostos para o tratamento de água como exemplo. A venda dos produtos atrelados a um modelo de pagamento vinculado à performance é viabilizada através do compartilhamento de dados em tempo real, analisando *in situ* o desempenho do produto. Nesse sentido, o monitoramento e escolha de matérias-primas à distância, acompanhamento do transporte e armazenamento de materiais em tempo real, entre outros, são também oportunidades com maior rastreabilidade e segurança para a indústria química. A KPMG destacou recentemente que, com o *Big Data* e ferramentas analíticas, muitas empresas do setor estão desenvolvendo soluções inteligentes a partir de dados de fornecedores, chão de fábrica, vendas, marketing, P&D e terceiros.

Como oportunidades para a Indústria Química brasileira, Abiquim e Deloitte (2018) citam, entre outros pontos, incentivo ao desenvolvimento sustentável dos demais setores, uso de energia a partir de fontes renováveis e a Química 4.0. Respectivamente, o panorama é de que: o setor possui potencial para contribuir com o desenvolvimento sustentável ao promover produtos e processos que poupem os recursos naturais e gerem menos impacto ao meio ambiente; fontes de energia renovável podem redinamizar a indústria química, especialmente aquelas relacionadas ao tratamento de biomassa; e, com a digitalização, a expectativa é de que esse segmento assuma um papel importante ao unir energia e o setor industrial, fazendo uso de oferta em energia renovável até manufatura de matérias-primas sintéticas, reduzindo então o uso de materiais fósseis.

CAPÍTULO III A INDÚSTRIA 4.0 E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Esse capítulo apresenta a conceituação de sustentabilidade, suas classificações e potencialidades dentro do cenário atual. Além de introduzir o conceito inicial de geração de energia, de modo a discutir as possibilidades para sustentabilidade da Indústria 4.0 dentro de energias renováveis.

3.1. Conceito de Sustentabilidade

A origem do termo sustentabilidade ocorreu no ano de 1987 durante uma Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU). A então presidente da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, G. Harlem Brundtland, apresentou um relatório, no qual caracterizava desenvolvimento sustentável como aquele que atende o desenvolvimento do presente sem prejudicar a existência das gerações futuras (FARIA, 2014).

A **Tabela 3.1**, a seguir, mostra quais foram os principais marcos históricos ligados a sustentabilidade ao longo dos anos.

A sustentabilidade está relacionada ao desenvolvimento sustentável e deve reunir ideias e estratégias que contemplem todos os pilares. Buscando ser socialmente justo, economicamente viável e ambientalmente correta. Dos inúmeros conceitos ligados ao termo tem-se o crescimento sustentado, que é quando a economia cresce de maneira segura e constante; gestão sustentável que corresponde a administrar uma organização evitando impactos ambientais e valorizando o meio ambiente (TERTULIANO et al, 2019).

Tabela 3.1 – Principais Marcos Históricos da Sustentabilidade

1980	Em 1980 surge a noção de Ecologia profunda, que coloca o homem como o componente de sistema ambiental complexo, holístico e unificado.
1983	A ONU criou a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento que desenvolveu o paradigma de desenvolvimento sustentável, cujo relatório (Our Common Future) propunha limitação do crescimento populacional, garantia de alimentação, preservação da biodiversidade e ecossistemas, diminuição do consumo de energia e desenvolvimento de tecnologias de fontes energéticas renováveis, aumento da produção industrial a base de tecnologias adaptadas ecologicamente, controle da urbanização e integração campo e cidades menores e a satisfação das necessidades básicas.
1992	Realizou-se no Rio de Janeiro a ECO-92 (a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento) na qual foram elaboradas a Carta da Terra (Declaração do Rio) e a Agenda 21, que reflete o consenso global e compromisso político objetivando o desenvolvimento e o compromisso ambiental.
1997	Discutido e negociado em Quioto no Japão, o Protocolo propõe um calendário pelo qual os países membros teriam obrigação de reduzir a emissão de gases do efeito estufa. Em novembro de 2009, 187 países haviam aderido ao Protocolo.
2002	Aconteceu, em Johannesburgo, a conferência mundial denominada Rio + dez, onde se instituiu a iniciativa “Business Action For Sustainable Development”.
2009	Realiza-se em Copenhague a 15ª Conferência do Clima (COP 15) das Nações Unidas, evento que reuniu 25 Chefes de Estado.

Adaptado de: Bacha et al. (2010).

3.1.1. Pilares da Sustentabilidade

O considerado tripé da sustentabilidade tem como objetivo o equilíbrio entre o social, ambiental e o econômico (FRANCE, 2013).

- **Sustentabilidade Ambiental:** cuidar e zelar do meio ambiente se tornou uma tendência, nos últimos anos. É fundamental analisar quais os efeitos sobre o meio ambiente que uma atividade econômica pode trazer, nesse sentido empresas e sociedade devem se alinhar para criar novas ideias a fim de amenizar os efeitos negativos de toda atividade (FRANCE, 2013).
- **Sustentabilidade Econômica:** pode ser relacionado com o crescimento da produtividade e a renda por habitante. Deve incentivar que o crescimento seja sustentável e com distribuição de recursos mais igualitária para a sociedade, sendo que possuir um capital maior acarreta maior investimento e retorno para a população (SANTESSO, 2012).
- **Sustentabilidade Social:** a sustentabilidade social está relacionada com o “Bem Estar Social” e a qualidade de vida da população, com objetivo de reduzir as diferenças sociais (SANTESSO, 2012).

3.2. A Sustentabilidade e a Indústria

De uma maneira geral, o comportamento da economia global se baseava em que os recursos materiais não fossem limitados e isso levou ao uso descontrolado de recursos naturais, como combustíveis fósseis, biomassa e de minerais (LOPES, 2019).

A indústria foi responsável pelo desenvolvimento rápido das cidades e sociedade, porém para tal foi liberado grandes quantidades de gases nocivos e impuros na atmosfera que prejudicaram o meio ambiente. Nesse sentido, as empresas atualmente vêm sofrendo uma pressão da necessidade de incentivar e promover o desenvolvimento sustentável, garantindo o crescimento econômico e ao mesmo tempo minimizar os danos já causados ao meio ambiente ou evitar futuros (TERTULIANO et al, 2019).

Para alcançar o desenvolvimento sustentável é preciso de metas para longo prazo e nesse sentidos foram definidos os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) para o futuro, alguns desses objetivos são: combater a fome e aliviar a pobreza; reduzir a desigualdade; garantir acesso à água, ao saneamento e à energia; combater às mudanças climáticas e seus impactos e promover o uso consciente de ecossistemas terrestres (CARVALHO, 2015).

Inovar levando em conta os três pilares da sustentabilidade ainda é um grande desafio, pois requer novos instrumentos e novos modelos de gestão. Não deve ser uma obrigação somente por parte das empresas, mas também das intuições de ensino e pesquisa, assim como dos órgãos governamentais (BARBIERI, 2010).

Sendo assim, deve existir uma boa relação entre Ciência, Tecnologia, Inovação e Sociedade do Conhecimento com as empresas capacitadas, garantindo que será presente o conhecimento intelectual e a base produtiva (IPEA, 2008).

Através do uso das ferramentas da indústria 4.0, busca-se aumentar a produtividade e a eficiência para os processos industriais, além de também minimizar os efeitos nocivos ao meio ambiente. Outro ponto importante, é que com as novas tecnologias espera-se que a quantidade de resíduos gerados reduza ao longo dos anos e assim permite às empresas criar destinos eficientes para seus produtos que se encontram na fase final da vida útil (TERTULIANO et al, 2019).

De modo geral, a inovação incentiva que o desenvolvimento econômico seja sustentável e que permita a competitividade das empresas para se manterem no mercado (PINSKY et al, 2015).

“Para acelerar o crescimento dos renováveis é preciso: 1) vencer as resistências dos mercados e eliminar os subsídios às fontes não-renováveis (fósseis e nuclear); 2) subvencionar a entrada de novas tecnologias, reduzindo seus custos; 3) estabelecer políticas mandatórias e progressivas para sua introdução; 4) disseminar as tecnologias para que os países em desenvolvimento as incorporem mais rapidamente sem ter de passar por estágios intermediários e mais poluentes (efeito *leapfrogging*)” (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

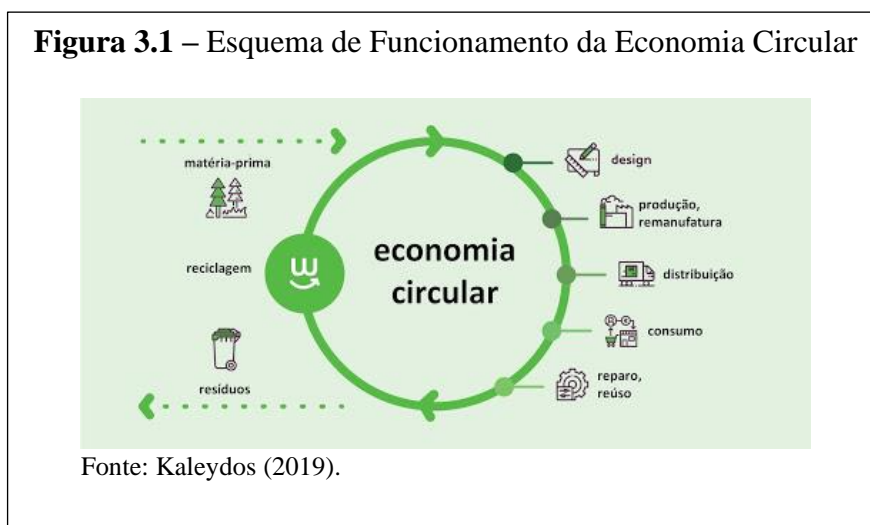
3.2.1. Conceitos Ligados à Sustentabilidade – Economia Circular

O uso desordenado dos recursos naturais gerou um outro problema que é o grande volume de resíduos gerados e sem ter coleta ou destino adequado, muitas vezes descartado de modo errôneo e causando prejuízos ao meio ambiente. Em 2017, só da indústria de transformação digital foram descartados 48 milhões de toneladas de resíduos (LOPES, 2019).

A economia circular surge do princípio de não desperdiçar e é baseado no próprio ciclo da natureza (LOPES, 2019).

De acordo com a Deloitte (2017), pode-se entender como economia circular as medidas tomadas que contribuem para economizar, como por exemplo estendendo a vida útil dos produtos, reduzindo o consumo de recursos utilizados na fabricação. Além de aplicar mais a reciclagem e reutilização.

Para exemplificar o funcionamento da economia circular, a **Figura 3.1**, apresenta um esquema simplificado desde a entrada da matéria-prima até a saída dos resíduos.



Ainda com base na Deloitte (2017), alguns exemplos de caso que foram aplicados a economia circular no setor químico:

- **(Re)desenhar:** Substituição do aço e do alumínio pela fibra de carbono na produção de veículos, garantindo redução do peso e menor consumo de combustível e emissão de CO₂.
- **Retorno:** A empresa SafeChem, através de parcerias com outras indústrias ligadas a limpeza conseguiu reduzir a quantidade de solventes presentes em águas residuais.
- **Produção eficiente em recurso:** A Covestro também tem exemplo de fabricação de produtos químicos que protegem o clima e economizam recursos naturais substituindo parte do petróleo usado por outros processos de produção menos poluente.
- **Reciclar:** Uma associação de empresas pretendem começar a produção de metanol de base biológica e etanol utilizando resíduos que não podem ser reciclados mecânicamente.

A economia circular também vem ganhando força em aplicações na agricultura por estar relacionada ao uso dos recursos naturais e diposta a utilização do três R's – Reciclar, Reutilizar e Reduzir (LOPES, 2019).

Na produção do etanol – tema que será discutido nos capítulos seguintes - pode ser percebida a economia circular durante o ciclo de vida do etanol. Já é uma realidade durante esse processo a reutilização dos subprodutos, utilizados como fonte de vapor na geração de energia através da queima do bagaço ou como fertilizantes no próprio campo de cultivo, com a torta de filtro e vinhaça (DIAZ, 2011). Além disso, a palha da cana fica no local de cultivo como forma de proteção e enriquecimento do solo (LOPES, 2019).

3.2.2. Políticas de Estímulo à Inovação Sustentável

As leis, dentro do contexto de desenvolvimento sustentável tem uma importância muito grande, tanto no sentido de fiscalização em prol do meio ambiente quanto para incentivar e promover novas linhas de pesquisas e desenvolvimentos, garantindo uma inovação ao país.

Segundo um estudo realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2008), sobre a inovação e seus impactos no setor produtivo do Brasil, as empresas que mais investem em Pesquisa e Inovação obtêm uma margem de lucro maior e beneficia também os seus trabalhadores. Porém, ainda o número de empresas ainda do setor produtivo que investem em inovação é baixo.

De acordo com o Ipea (2008), “a experiência internacional mostra que o desenvolvimento de um robusto Sistema Nacional de Inovação foi de fundamental importância para os países que lograram maiores níveis de desenvolvimento”. Sendo de grande importância para que um país tenha sucesso na inovação sustentável tenha também uma boa política de incentivo.

Já vem sendo implementadas no Brasil políticas de apoio à inovação para as empresas, com objetivo de desenvolver cada vez mais produtos, processos e distribuição mais sustentáveis. Em 2003, a inovação foi considerada como fator de grande importância para que as empresas brasileiras alcancem a diferenciação de seus produtos e se destaquem no mercado (IPEA, 2008).

Os principais financiadores de projetos de Pesquisa e desenvolvimento (P&D) das empresas e das Universidades no país é o BNDES e a Finep (IPEA, 2008). Sendo que o BNDES oferece financiamento para atividades inovadoras realizadas pelas empresas e

para as atividades científicas existem as fundações de apoio à pesquisa que também oferecem crédito.

Assim como já existe em outros países, no Brasil existe a Lei de Inovação que permite o financiamento direto à inovação na empresa, realizado a partir de uma disputa e a escolhida tem seus recursos destinados aos projetos tecnológicos (IPEA, 2008).

3.2.3. Impactos da Utilização de Fontes de Energia não Renováveis

O problema do aquecimento global tem se intensificado em consequência das ações humanas ao longo das gerações e também do uso de combustíveis fósseis que contribuem para o aumento dos gases do efeito estufa (GEE) (LIMA, 2012), como metano, (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e outras substâncias liberadas na atmosfera (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Grande parte da responsabilidade dos efeitos nocivos causados ao meio ambiente, que levou ao aumento do efeito estufa, está relacionado ao sistema energético mundial (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Um dos gases responsáveis pela intensificação do efeito estufa, o CO₂, é liberado principalmente da queima do carvão como combustível fóssil. O carvão pode gerar aproximadamente duas vezes mais de CO₂ que o gás natural considerando a mesma quantidade de energia (FAPESP, 2010).

Nesse contexto, alguns dos principais motivos que não se deve permanecer no sistema energético atual, resumidamente, são que os limites das reservas naturais já estão baixos e as mudanças climáticas que vem acontecendo (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Sendo assim, se faz necessário que sejam feitas alterações na situação atual em busca de minimizar esses efeitos e encontrar novas formas de gerar energia levando em consideração o desenvolvimento sustentável (LIMA, 2012).

3.3. Eficiência Energética

De acordo com a ENGIE, a Eficiência Energética trata-se de “um consumo de energia elétrica com menos recursos, evitando desperdícios e contribuindo com o meio ambiente”.

Políticas públicas devem incentivar o uso e produção de fontes de energias limpas devido a atual situação de intensificação do efeito estufa e mudanças climáticas. Nesse sentido

o mercado brasileiro deve contar com apoio de órgãos públicos para investimentos em tecnologia e pesquisas, a fim de obter energia limpa (LIMA, 2012).

Segundo o Portal Solar, no Brasil já existem algumas empresas que colaboram para a geração de energia a partir do uso de fontes renováveis, dentre elas estão:

- **Banco do Brasil:** Em parceria com uma empresa portuguesa de energia elétrica, o Banco do Brasil pretende gerar energia suficiente para 58 de suas agências durante 15 anos.
- **Braskem:** A empresa fez uma parceria com a EDF Renováveis com o objetivo de comprar energia eólica durante 20 anos e assim também apoiar o desenvolvimento do Complexo de Folha Larga.
- **Ambev:** Já a empresa Ambev pretende ter toda a eletricidade utilizada em seus processos vinda de fontes limpas até o ano de 2025. Para isso investiu em usinas de energia eólica.
- **Google:** Todas as filiais espalhadas pelo mundo pertencente a Google trabalham com somente energia renovável.

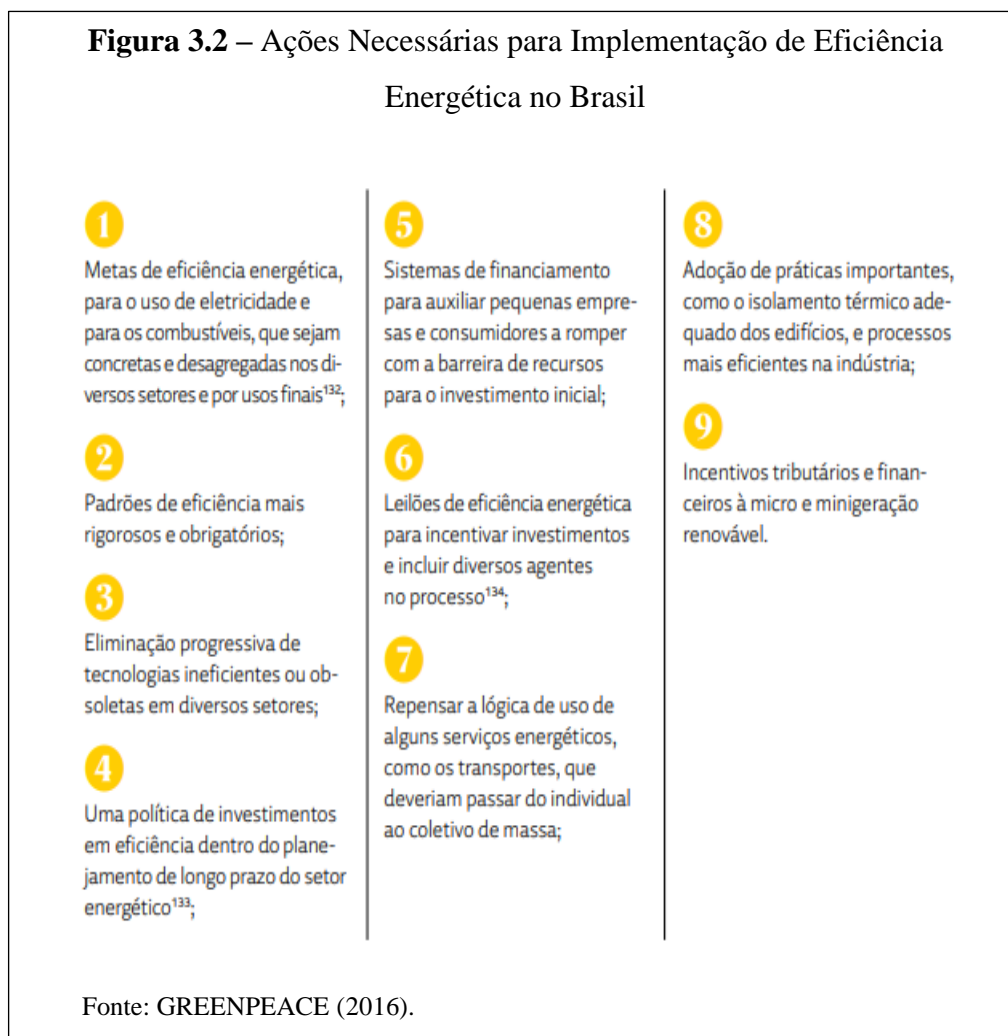
Segundo o Pacto Global (2018), “ser sustentável não é mais uma opção, é condição essencial para participação no mercado internacional, exportando mercadorias e serviços, e recebendo investimentos”.

A previsão para o Brasil é que juntamente com o crescimento econômico também aumente a demanda pela energia. Há expectativas para que haja crescimento da oferta de eletricidade em mais setores substituindo o que vem da queima de combustíveis fósseis (GREENPEACE, 2016).

Acredita-se que com essas trocas de fontes de energia haverá uma redução na emissão dos gases responsáveis pelo aumento do efeito estufa em 20%, passando a utilizar como fonte de energia a biomassa. Apesar de inicialmente parecer que essa substituição represente investimentos extras o saldo no final é positivo (MENEZES et al, 2011).

O Brasil ainda carece de muitas melhorias no sistema de fornecimento de energia, tanto para os consumidores quanto para as indústrias. Pois, para que o funcionamento industrial aconteça sem intercorrências é fundamental que sua rede elétrica não tenha interrupções (FIRJAN, 2016).

A **Figura 3.2**, exemplifica algumas das ações que devem seguidas para ser possível a implantação de Eficiência Energética no Brasil.



Segundo o Greenpeace (2016), acredita-se que “o emprego de melhores práticas e tecnologias faria com que a demanda global de energia fosse reduzida em 47% até 2050”.

Nesse sentido, já vem sendo feito em vários países ações na tentativa de promover a limpeza de danos causados pelo uso de combustíveis fósseis através da captura CO₂ e posterior lançamento em depósitos subterrâneos – porém esse processo não resolve ainda o problema das mudanças climáticas e intensificação do efeito estufa (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

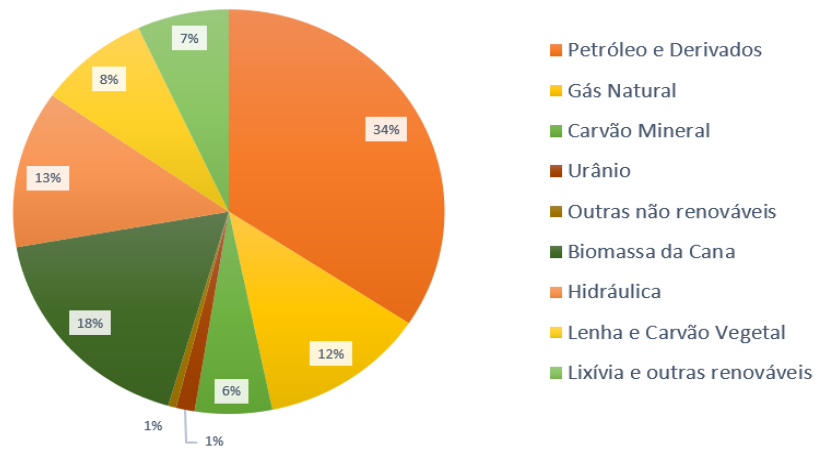
3.4. Matriz Energética Brasileira e Potencial Geração de Energia Renovável

Ao contrário da não renovável, fontes renováveis são vistas como “inesgotáveis”, pois se regeneram a longo prazo. Como a reposição das fontes de energia fóssil e nuclear exige um espaço de tempo geológico, essas são consideradas não-renováveis (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Em suma, as fontes fósseis de energia foram formadas a partir da matéria orgânica que se acumulou no subsolo terrestre ao longo de milhões de anos, originando substâncias como petróleo, carvão mineral e gás natural. Alguns elementos químicos presentes na crosta terrestre geram energia através da fissão de seus núcleos (fontes primárias de energia nuclear), caso do urânio. Enquanto isso, os potenciais hidráulicos (quedas d'água), eólicos (ventos), radiação solar, o calor do fundo da Terra (geotermal), a energia maremotriz (marés e ondas) e biomassa geram energia e podem ser repostos, portanto, considerados renováveis (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

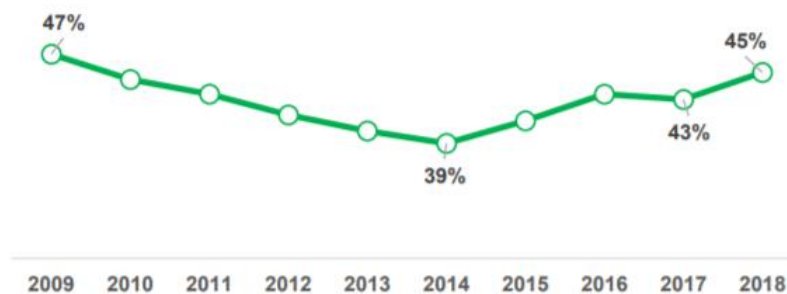
Do ponto de vista sustentável, a queima de combustíveis fósseis é responsável por emissões de diversos poluentes, desde os principais GEE emitidos na queima desses combustíveis até enxofre. A utilização da energia também contribui para a liberação de metais como chumbo e mercúrio – compostos críticos quando expostos ao meio ambiente. Ademais, a extração, transporte e processamento de fontes de energia primária – como carvão, petróleo e urânio – estão associados a uma série de riscos para o solo, água e ecossistemas (IAC, 2007).

Todavia, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019), a Matriz Energética brasileira possui grande participação em energia renovável, 45,3% com base no ano de 2018, onde: 17,4% cana-de-açúcar, 12,6% hidráulica, 8,4% lenha e carvão vegetal e 6,9% lixo e outras. No que diz respeito às fontes não renováveis, o petróleo é o mais dominante (34,4%), seguido do gás natural com 12,5%, 5,8 % com o carvão mineral e 1,4% com urânio (**Figura 3.3**).

Figura 3.3 – Matriz Energética Brasileira

Adaptado de: Goldemberg; Lucon (2007).

Devido à grande importância da energia renovável na matriz energética, o Governo Federal considera o setor como um dos mais estratégicos para o país. De um modo geral, a Oferta Interna de Energia (OIE) – definida como a energia necessária para movimentar a economia dos países – baseia-se majoritariamente em fontes fósseis, do ponto de vista mundial (MDIC, 2018). Em comparação aos resultados mundiais, as fontes renováveis eram 43,5% no Brasil e 13,7% na escala global – com referência no ano de 2016 (**Figura 3.4**).

Figura 3.4 – Participação das Renováveis na OIE Brasileira

Adaptado de: EPE (2019).

CAPÍTULO IV A PRODUÇÃO DO ETANOL E SEUS DESAFIOS

Neste capítulo são analisadas as principais etapas do ciclo produtivo do etanol, ressaltando sobre o uso de combustíveis fósseis nas atividades e como isso influencia na eficiência energética.

4.1. Geração de Energia pela Biomassa e os Biocombustíveis

Dentro deste estudo, a geração de energia pela biomassa da cana de açúcar na produção de etanol foi considerada como ponto central, uma vez que, dentre as fontes renováveis de energia disponíveis atualmente, a biomassa da cana evidencia-se como sendo a mais significativa no contexto brasileiro – correspondendo a 17,4% da Oferta Interna de Energia, ficando atrás somente do petróleo e seus derivados (34,4%) na Matriz Energética (EPE, 2019).

Além disso, em termos de consumo industrial, o bagaço de cana fica em segundo lugar (16,3%), depois da tradicional eletricidade (21,3%). Todavia, na Matriz Elétrica, o bagaço de cana – em conjunto com a lenha, lixo, biodiesel e outras fontes primárias – ocupa a terceira posição (8,5%), com hidráulica em primeiro (66,6%) e gás natural em segundo (8,6%). Já no setor do transporte, o consumo do etanol é de 18,8%, óleo diesel 43,6% e gasolina 25,8% (EPE, 2019).

Por esse motivo, os biocombustíveis líquidos (em especial o etanol) são cada vez mais relevantes para a matriz energética mundial, como uma das formas mais indicada de energia renovável para o setor de transporte, competindo diretamente com os combustíveis fósseis (DÍAZ, 2011).

Dito isso, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008), a biomassa é entendida como a matéria orgânica que pode ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. De acordo com a sua origem, ela pode ser dividida em: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz, cana de açúcar, por exemplo) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, inclusive o lixo).

Para a produção em larga escala de energia elétrica e biocombustíveis, cita-se o uso da biomassa agrícola – obtida pelo processamento dos resíduos das agroindústrias e suas plantações. Dessa forma, a partir da cana de açúcar é possível utilizar como matéria prima para potencial energético: o bagaço, a palha e o vinhoto (ANEEL, 2008).

Em relação às técnicas utilizadas para a transformação da biomassa em energia, tem-se (ANEEL, 2008):

- a **combustão direta**, onde a combustão é a transformação da energia química em calor, por meio das reações com o oxigênio fornecido. Método utilizado em fogões (cocção de alimentos), fornos (na metalurgia) e caldeiras para a geração de vapor;
- a **pirólise ou carbonização**, o mais antigo dos processos de conversão de um combustível sólido (normalmente lenha) em outro de maior disponibilidade energética (carvão). Consiste no aquecimento do material em altas temperaturas e “quase ausência” de ar. Neste caso, o principal produto é o carvão vegetal, com densidade energética duas vezes superior ao combustível de origem e, por isso, queima em temperaturas mais elevadas;
- a **gaseificação** que, por meio de reações termoquímicas envolvendo vapor quente e oxigênio, torna possível a transformação do combustível sólido em gás (mistura de monóxido de carbono, nitrogênio, hidrogênio, metano e dióxido de carbono). Este gás, por sua vez, pode ser utilizado em motores de combustão interna e turbinas. Além disso, é possível remover os componentes químicos nocivos ao meio ambiente e a saúde humana;
- a **digestão anaeróbica** que consiste na decomposição do material, na ausência de ar e pela ação de bactérias. Prática utilizada no aproveitamento energético de dejetos orgânicos (esterco animal), gerando o biogás – composto basicamente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2);
- a **fermentação**, pela qual os açúcares de plantas como cana de açúcar são convertidos em álcool pela ação de microrganismos. O produto resultante é o etanol, seja na forma de álcool hidratado e, em menor escala, o álcool anidro. Ademais, o resíduo sólido do processo pode ser utilizado em usinas termelétricas para a produção de eletricidade;
- e a **transesterificação**, reação de óleos vegetais com um produto intermediário ativo (metóxido ou etóxido), proveniente da reação entre álcoois (metanol ou etanol) e uma base (hidróxido de sódio ou de potássio). Os derivados são a glicerina e o uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos (o biodiesel), utilizado em motores de combustão interna. No Brasil, a este processo é baseado na palma e babaçu (região

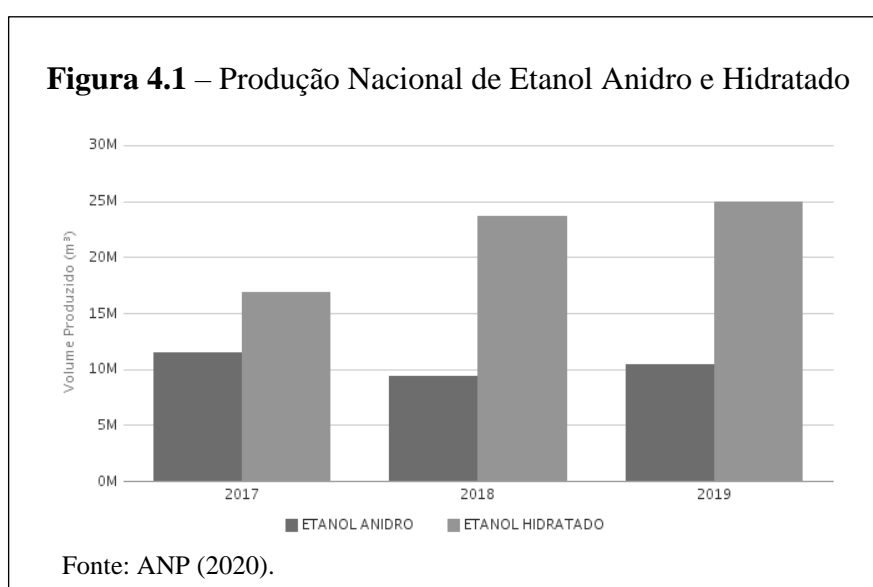
Norte), soja, girassol e amendoim (regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste) e mamona (semiárido nordestino), além de outras matérias primas de origem vegetal.

4.2. Produção do Etanol Brasileiro a partir da Cana de Açúcar

O álcool etílico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), ou etanol, pode ser gerado a partir do processamento e fermentação de cana de açúcar, milho, beterraba, batata, entre outros. Na indústria sucroalcooleira brasileira, a cana é a principal matéria-prima e pode ter dois destinos: produção de açúcar ou etanol (ANP, 2016).

Devido à necessidade de amenizar as crises do setor açucareiro e redução da dependência do petróleo importado, no começo do século XX, o etanol foi introduzido na matriz energética do Brasil. No ano de 1925 ocorre a primeira experiência brasileira com etanol combustível. Já em 1933, através do Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA) e, pela Lei nº 737, torna-se obrigatória a mistura de etanol na gasolina. O IAA foi finalizado em 1990, todavia, a partir de 2003, com os veículos *flex-fuel* – que admitem operar com qualquer porcentagem de etanol na mistura combustível –, o setor ganhou novo impulso (LEITE; CORTEZ, 2008).

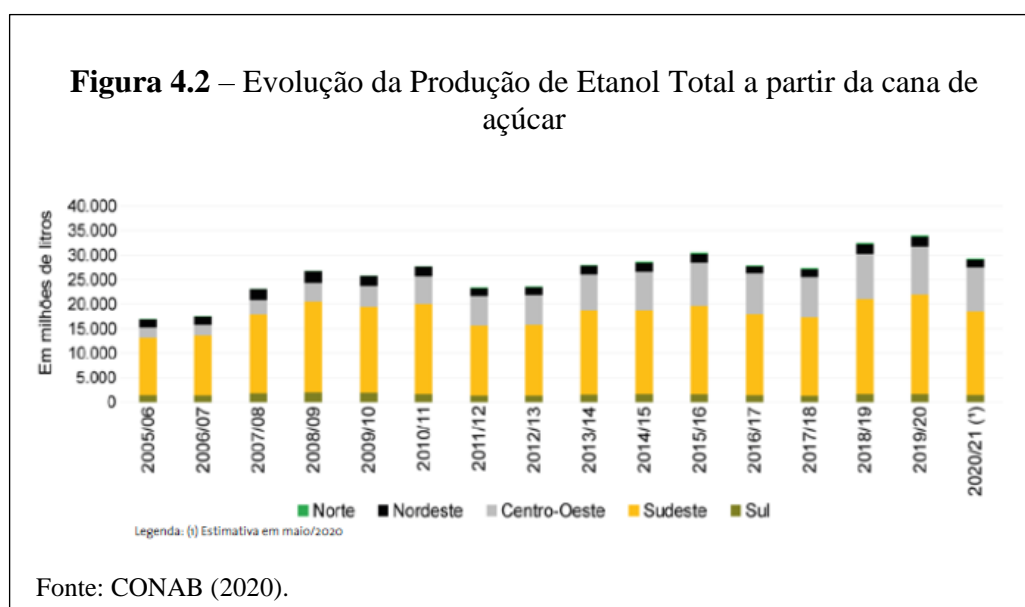
Atualmente, os automóveis utilizam duas categorias de etanol (hidratado e anidro), onde a maior produção compete ao primeiro (**Figura 4.1**), usado diretamente em motores desenvolvidos para este fim, com tecnologia flex. O anidro, por sua vez, é misturado à gasolina em proporções variáveis (ANP, 2016).



Em relação ao processamento, este pode ser definido como de 1ª geração ou 2ª geração. A diferença mais relevante entre as plantas de 1º e 2º geração é que as de segunda geração

incluem etapas de pré-tratamento e hidrólise da celulose anteriores à fermentação. Essas tecnologias permitem aumentar a produção de etanol, com a mesma área plantada, devido ao aproveitamento do bagaço e da palha (ANP, 2016). Isso porque uma parte considerável do vegetal não é açúcar, nem amido, mas fibras – as quais não podem ser digeridas pelos fermentos tradicionais (LEITE; CORTEZ, 2008). O ATR (Açúcar Total Recuperável) da cana-de-açúcar é um dos indicadores que apontam a qualidade da cana – segundo sua capacidade de ser convertida em açúcar ou etanol –, podendo ser influenciado por clima, idade das lavouras e a forma de colheita (CONAB, 2020).

A produção de etanol oriundo de cana-de-açúcar deverá ser de 29,3 bilhões de litros, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020) – 13,9% em relação à safra passada (a maior do setor sucroenergético nacional). Os números das últimas safras (**Figura 4.2**) apontam a tendência de aumento da produção de etanol com grande participação dos estados de São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, respectivamente.



4.3. Etapas de Produção do Etanol

Em geral, as etapas para a produção do etanol de cana de açúcar podem ser concentradas em cinco blocos: extração da matéria-prima, produção, reciclagem, distribuição e utilização do produto. De forma resumida, a extração da matéria prima corresponde ao cultivo da cana; a produção concentra-se na fase de transformação industrial, desde a entrada na usina, incluindo também a geração de energia elétrica e vapor; a reciclagem proporciona a utilização de

subprodutos para aplicação em fertirrigação (técnica de fertilização via irrigação), por exemplo; a distribuição transporta o etanol até os postos de venda; e a utilização se dá pela combustão em veículos automotores (DÍAZ, 2011).

Para este trabalho, a análise central parte de dois blocos principais no contexto de Indústria Química e oportunidades para a Indústria 4.0: a **extração da matéria prima** e a **produção**.

4.3.1. Extração da Matéria Prima

De acordo com Santiago e Rossetto (2007a), a fase agrícola do processo canavieiro, considerando que a área já tenha sido desmatada e que seja utilizada para a agricultura, inicia-se pelas operações de limpeza do terreno, avaliação da qualidade do solo, nivelamento, aração e gradagem – a fim fornecer as condições biológicas e físico-químicas necessárias.

Além disso, segundo Ometto (2005), o ciclo do plantio e colheita se dá pelo preparo periódico do solo. Isso porque, após o primeiro corte, a planta continua a crescer para a nova colheita. Tem-se a chamada cana soca (segundo corte) e cana resoca (terceiro corte em diante), por até cinco seguidos. A produtividade vai decrescendo a cada colheita, até chegar ao ponto de limpeza total do terreno, para o recomeço de outro ciclo.

A renovação do canavial pode ser realizada pelo método mecânico, químico, ou até mesmo ambos em conjunto. Para o método mecânico, Santiago e Rossetto (2007b) elencam as seguintes operações: aração e gradagem ou gradagem pesada, subsolagem, sulcamento e adubação. Além da atividade de desenraizar a soqueira – raízes que sobraram dentro e fora da terra após o corte – de modo mecânico, pode-se utilizar também o modo químico, em conjunto com as operações de preparo de solo, mediante a aplicação de herbicida.

Um ponto que deve ser ressaltado é que o cultivo da cana-de-açúcar fez parte da colonização do Brasil e de alguns outros países. Sua utilização inicial era como alimento através da produção de açúcar e atualmente vem se destacando também pela produção de energia a partir do etanol, como já levantado anteriormente. Na Índia a cultura da cana-de-açúcar representa uma das mais importantes para a indústria e ocupa cerca de cinco milhões de hectares do seu território (EMBRAPA, 2015). Assim como o Brasil, o país também é um grande produtor de cana-de-açúcar, considerado um dos maiores consumidores de açúcar do mundo (PAIVA, 2014). Todavia, o plantio é manual e realizado por inúmeras famílias, posteriormente fornecidos às usinas para a realização das etapas de processamento, o que difere do Brasil, onde

a usina é responsável pela produção e apenas 70 mil famílias participam da parte produtiva (PAIVA, 2014).

- **Etapa de Plantio**

A operação de plantio pode ser manual ou mecanizada, existindo ainda dois métodos, o direto e o convencional. No método direto, o sulco – canal onde a muda de cana é colocada – é feito por meio de um sulcador sobre a palha restante. Já no convencional, o terreno é submetido a operações de aração e gradagem, seguidas do sulcador no solo sem palha. Em casos de solo muito compactado, utiliza-se a subsolagem a fim de facilitar a penetração e o desenvolvimento das raízes no solo (DÍAZ, 2011).

No modo manual, o plantio é realizado com o auxílio de um caminhão que transporta a cana; alguns funcionários cortam a planta em pedaços (toletes), outros distribuem-na no sulco. Segundo Díaz (2011), este modo, associado à erradicação convencional da soqueira, mecânico e químico, são os mais usuais.

- **Etapa de Manejo**

Com o plantio, tem-se o manejo da cultura, a fim de acompanhar as propriedades físicas e químicas do solo; eliminar ou reduzir a concorrência de plantas invasoras; preservar o sistema de controle de erosão; e controlar pragas ou doenças (DÍAZ, 2011).

Por esse motivo, esta etapa compreende a aplicação de agrotóxicos e a adubação, a fim de garantir a máxima produtividade. Os minerais necessários em maior quantidade são denominados macronutrientes: Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S). Aqueles exigidos em menor quantidade são os micronutrientes: Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), entre outros (DÍAZ, 2011).

Díaz (2011) explica que a adubação fosfatada é amplamente utilizada para aumentar a produtividade dos canaviais, principalmente brasileiros – que são, em geral, deficientes em fósforo. Nesse mesmo sentido, o potássio estimula a vegetação e facilita o armazenamento de açúcar, além de ajudar na fixação do nitrogênio, regular a utilização da água e aumentar a resistência à seca, geada e moléstias.

- **Etapa de Colheita**

Após a atuação de herbicidas e inseticidas na fase anterior, chega-se à colheita, onde ocorre a queima da palha da cana de açúcar, prévia ao corte, em 60% das áreas produtoras no Estado de São Paulo (BODDEY et al.,⁶ 2008 apud DÍAZ, 2011).

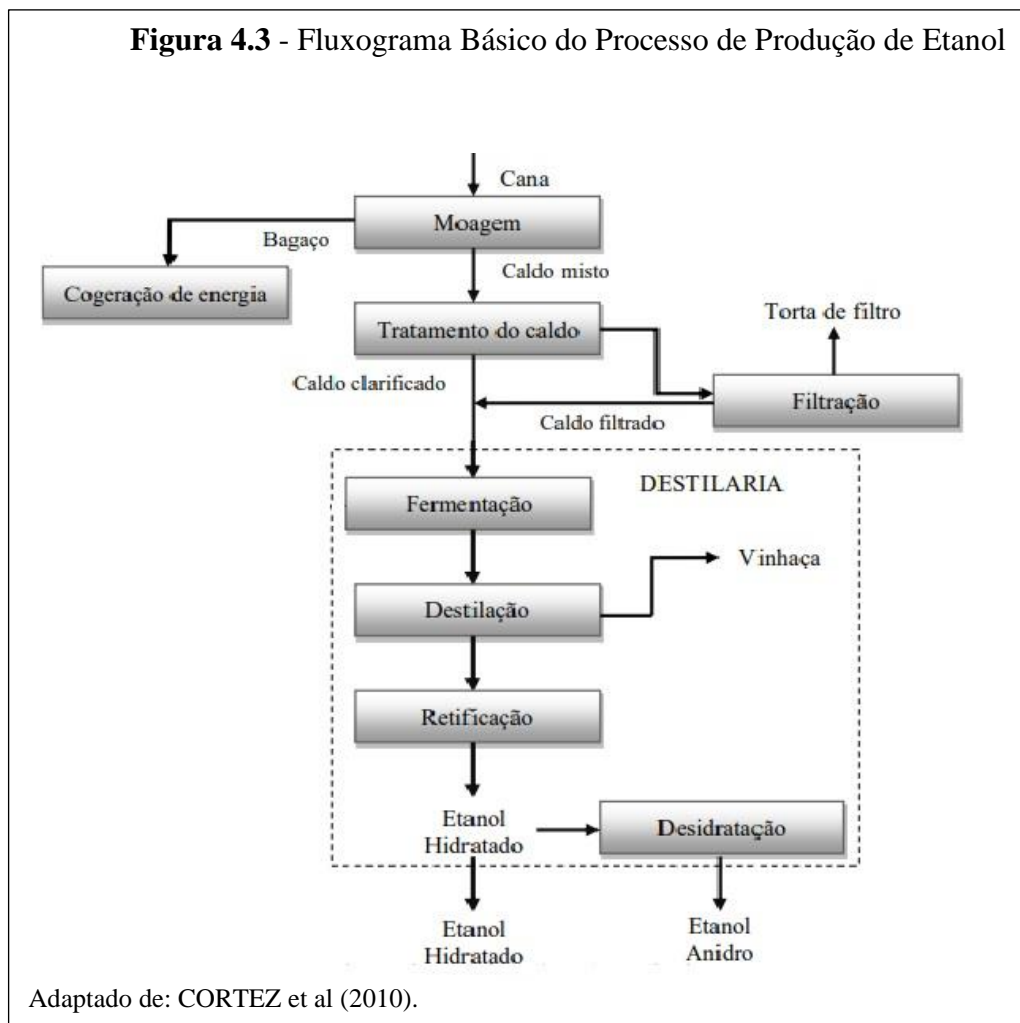
O processo da queima da palha é dividido em três fases (ROSSETTO, 2007):

- **Ignição:** na presença de oxigênio e baixa temperatura, período inicial e breve com pouca concentração de poluentes;
- **Combustão Incompleta:** com altas temperaturas e geração de gases tóxicos, como CO, CO₂, NO_x (óxidos de nitrogênio), SO_x (óxidos de enxofre), entre outros;
- **Resfriamento:** redução da temperatura e liberação de materiais particulados, os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e outras substâncias orgânicas da combustão incompleta.

4.3.2. Produção (Usina)

A produção do álcool combina diversos processos até a obtenção do etanol. Uma descrição detalhada de cada etapa envolvida no processo industrial é discutida a seguir, com base no fluxograma apresentado na **Figura 4.3**.

⁶ BODDEY, R. M.; SOARES, L. H. D. B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Bio-Ethanol Production in Brazil. In:___ Biofuels, solar and wind as renewable energy systems beneficts and risks. New York Springer, 2008. p. 32.

Figura 4.3 - Fluxograma Básico do Processo de Produção de Etanol

- **Etapa I: Recepção, Limpeza, Preparo**

Ao chegar na usina, a cana de açúcar é descarregada por caminhões e conduzida em esteiras para o início do processo industrial. Em sequência, quando a cana é colhida manualmente e queimada, deve-se realizar a lavagem para retirada das impurezas, uma vez que estas podem exercer um papel negativo no processo industrial, provocando desgaste nas tubulações, bombas, aquecedores e moendas, por exemplo – além de prejudicam a decantação do caldo e a filtração do lodo (RODRÍGUEZ, 2010).

Algumas usinas descartam esta operação de lavagem, o que contribui para a redução de custos econômicos e ambientais devido à não utilização de água (DÍAZ, 2011). Como no caso da cana que é colhida mecanicamente, na forma de talos picados, onde o procedimento de lavagem não é realizado devido às elevadas perdas de sacarose. Nessa situação cita-se ainda o

uso de um sistema de limpeza a seco, através de ventiladores ou exaustores (UNICAMP; CGEE, 2009).

Na sequência, a cana de açúcar é submetida a uma série de facas e desfibradores para aumentar a eficiência de extração do caldo. O desfibrador tem a função de romper a maior quantidade de células, possibilitando que o açúcar seja extraído mais facilmente pelas moendas. O acionamento desses sistemas é feito por turbinas à vapor ou motores elétricos (VILELA, 2013).

- **Etapa II: Extração do Caldo**

Logo após o preparo da cana, inicia-se o processo de extração do caldo, que depois de tratado e concentrado será direcionado para a produção de açúcar ou álcool. O processo de extração consiste na separação física entre o caldo da cana e sua fibra (bagaço), onde, respectivamente, um é tratado e concentrado para a produção de etanol ou açúcar e o outro direcionado para cogeração de energia nas caldeiras (VILELA, 2013).

Este processo pode ser feito de duas formas: moagem ou difusão (MARQUES, 2009). A moagem, comum nos processos da indústria brasileira, baseia-se na extração do caldo por meio de fricção mecânica com a adoção de um conjunto de rolos de esmagamento – que impõem uma pressão mecânica à cana desfibrada (MARQUES, 2009).

Já no processo de extração pela difusão, o caldo é obtido por meio de um fluxo contracorrente de água.

A difusão pode ser explicada como o fenômeno pelo qual duas soluções de diferentes concentrações separadas por uma membrana semipermeável ou porosa, que após um intervalo de tempo se misturam até atingir o equilíbrio. As células de cana imersas na água atuam como membranas semipermeáveis e a sacarose é extraída pelo escoamento do fluido, por meio de um leito poroso da cana desfibrada (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, IPT⁷, 1990 apud NAZATO et al, 2011).

Após a extração, o caldo da cana segue para o processo de tratamento e é direcionado para preparação e produção do etanol.

⁷ INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Manual de Recomendações: Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e Álcool. São Paulo: IPT. 1990. 796p.

- **Etapa III: Tratamento do Caldo para Produção de Etanol**

O caldo extraído da cana deve passar por um processo de tratamento para eliminar possíveis resíduos de impurezas que podem prejudicar a qualidade do produto. Esses contaminantes a serem removidos podem estar dissolvidos ou não no caldo (PELLEGRINI⁸, 2009 apud VILELA, 2013).

O tratamento consiste basicamente em remover as impurezas do tipo bagacilho, areia, microrganismos e partículas coloidais – ao mesmo tempo garantindo que sejam preservadas as vitaminas, açúcares e aminoácidos (CORTEZ, 2008).

No início do processo, a mistura é pré-aquecida e o pH é corrigido utilizando hidróxido de sódio, em seguida ocorre o aquecimento permitindo que os gases sejam separados (VILELA, 2013).

Logo depois, o caldo segue para o processo de decantação ficando em repouso por cerca de 40 minutos até 2 horas. Obtém-se o lodo resultante, que segue para a etapa de filtração, e o líquido de interesse que continua o processo de produção de etanol (VILELA, 2013).

- **Etapa IV: Processo de Filtração**

O lodo passa por uma etapa de filtração e é separado em um líquido e um resíduo sólido. O líquido retornará ao processo de produção do etanol, enquanto o sólido, conhecido como torta de filtro, pode ser encaminhado para os campos de cultivo a fim de ser utilizado como fertilizante (DÍAZ, 2011).

- **Etapa V: Fermentação**

Após a etapa de tratamento, o caldo filtrado segue para tanques (dornas) onde receberá a levedura responsável por realizar a fermentação – em geral é usada a *Saccharomyces Cerevisia*. O processo ocorre pela quebra das moléculas de açúcar (glicose), sendo convertidos em CO₂ e etanol (NUNES, 2017).

A Equação resumida do processo de fermentação, de acordo com Vilela (2013), é:



⁸ PELLEGRINI, L. F. (2009). Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar. Álcool e eletricidade.

O etanol que pode ter sido arrastado pelo CO₂ liberado é recuperado em colunas lavadoras e a correção do pH da mistura é feita através da adição de ácido sulfúrico.

Nessa etapa são utilizados os seguintes equipamentos: dornas, trocadores de calor, centrífugas e tanques de tratamento de ácido (VILELA, 2013).

Essa etapa é geralmente demorada, levando aproximadamente 13 horas. Com a centrifugação, o resultado é um vinho fermentado misturado com uma média de 10% de etanol, podendo ainda estar presente na mistura o açúcar não fermentado – que deve retornar ao processo – e as leveduras que serão, posteriormente, recuperadas (NUNES, 2017).

- **Etapa VI: Destilação**

Segundo Díaz (2011), as destilarias de etanol no Brasil podem ser do tipo anexas ou autônomas. A mais comum delas é a anexa, as quais produzem álcool também a partir do produto da fermentação do melaço, subproduto da produção de açúcar (mosto de melaço). Já as destilarias autônomas somente produzem álcool pela fermentação direta.

O vinho do etanol, resultante da etapa anterior, segue para a coluna de destilação onde ocorre aquecimento e separação pela diferença de ponto de ebulição, seguida da condensação para recuperar os produtos na fase líquida.

Nessa etapa é obtido o etanol hidratado (NUNES, 2017). Após a destilação, a mistura passa pelo processo de retificação, com o objetivo de remover as impurezas que possam ter ficado – quanto melhor a separação melhor será a qualidade do etanol hidratado produzido (FUGITA, 2014).

Um subproduto da destilação é a vinhaça, que pode ser reaproveitada parcialmente na fertirrigação, sendo tratada também como um resíduo de alto impacto ambiental (LEE, 2017).

- **Etapa VII: Desidratação**

Na etapa de desidratação é preparado o álcool anidro, a partir do álcool hidratado produzido na etapa anterior. Para esse processo podem ser utilizadas diferentes técnicas com um agente solvente na coluna de destilação (NUNES, 2017).

A água e o álcool por se tratar de uma mistura azeotrópica – ou seja, comporta-se como uma substância pura e apresenta um ponto de ebulição fixo em uma certa composição – impossibilita que somente o processo de destilação seja suficiente para a separação.

Sendo assim, para obter o etanol anidro é necessário que o etanol hidratado siga para a coluna de desidratação (VILELA, 2013).

No Brasil, segundo Nunes (2017), o agente de absorção mais utilizado é o ciclohexano. Este é adicionado ao topo da coluna e o etanol anidro pode ser retirado pelo fundo.

Em seguida, o etanol anidro e hidratado seguem para tanques de armazenamento.

- **Etapa VIII: Cogeração de Energia**

A cogeração de energia consiste em aproveitar partes da cana que seriam descartadas, através da queima do bagaço e da palha (residuais do início do processo).

A combustão do bagaço gera vapor suficiente para acionar as turbinas, onde sua composição é de aproximadamente 60% celulose, 20% hemicelulose e 20% lignina, além da umidade presente (VILELA, 2013). Uma vantagem do uso do bagaço com fonte de energia é que ele possui número de carbono fixo e um alto valor de conteúdo volátil (NETO⁹, 2001 apud VILELA, 2013). Já a palha apresenta variação de umidade de acordo com a idade e condições em que se encontra – se são verdes, secas ou ponteiros (VILELA, 2013).

O bagaço de cana pode ser queimado em caldeiras, produzindo vapor superaquecido para a geração interna de energia elétrica – os excedentes de eletricidade podem ser vendidos para a rede pública (LEE, 2017).

4.4. Desafios Tecnológicos para a Produção de Etanol

De acordo com o desenvolvimento tecnológico da cadeia agroindustrial da cana de açúcar no Brasil, pode-se dizer, segundo os autores Brasil (2006), Pereira (2009) e Shikida, Azevedo e Vian (2011) que o setor é pioneiro na inovação agrícola do país. Avanço devido, basicamente, a dois fatores: a importação de tecnologias e a pesquisa interna focada na matéria-prima (RAMOS; SZMRECSÁNYI, 2002; PEREIRA, 2009; MORAES; BACCHI, 2014).

Em função da competitividade do etanol, dos padrões de produção e das demandas ambientais, novos desafios requerem o surgimento e adoção de tecnologias. Nesse sentido, estudos retratam que, atualmente, a pesquisa e o desenvolvimento (P&D) focam em pontos que vão além da cana de açúcar, contemplando também: o estudo de novas matérias-primas; o

⁹ NETO, V.C. (2001). Análise da viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa.

desenvolvimento de técnicas agrícolas; o aprimoramento do processo industrial e novas rotas para a obtenção do etanol; além de tecnologias de eficiência do processo e do consumo do produto (SANTOS; BOREM; CALDAS, 2012; BELARDO; CASSIA; SILVA, 2015).

Sendo assim, como desafios que evidenciam o direcionamento para investimentos e campos ou áreas do conhecimento, apontam-se os seguintes gargalos tecnológicos (NREL, 2007; ABDI, 2014; BRASIL, 2013):

- i) impulsionar a produtividade da matéria-prima;
- ii) promover a eficiência energética dos processos industriais, com economia de energia;
- iii) desenvolver a armazenagem, a conservação e o monitoramento da qualidade dos produtos;
- iv) e facilitar o aproveitamento integral da matéria-prima.

Na área sucroenergética, de forma mais específica, esperam-se progressos tecnológicos em duas perspectivas:

- a) **no âmbito agrônomo**, propõe-se o advento de novas técnicas agrícolas de produção, a fim de aumentar a produtividade agrônoma da cana (maior rendimento por área plantada, rendimento industrial e novas variedades). Busca-se soluções para a adaptação das variedades às diferentes condições climáticas, com maiores teores de açúcar ou fibras, além de adequação das técnicas de manejo e do desenvolvimento de máquinas de plantio e colheita (BELARDO; CASSIA; DA SILVA, 2015; LANDELL et al., 2015; IPEA, 2016).
- b) **no âmbito industrial**, almeja-se formas mais eficientes para o tratamento da biomassa, por avanços no processo de produção, novos insumos tecnológicos bioquímicos e, em particular, estudo de rotas tecnológicas do etanol de segunda geração (NREL, 2007; ABDI, 2014; BRASIL, 2013; IPEA, 2016).

CAPÍTULO V ANÁLISE DA PRODUÇÃO DO ETANOL BRASILEIRO DIANTE DA INDÚSTRIA 4.0 E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Neste capítulo, são discutidos os resultados do trabalho: os agentes da eficiência energética na produção de etanol e as soluções da indústria 4.0 para o aumento desse indicador.

5.1. Uso de Energia Fóssil na Produção de Etanol e seu Impacto na Eficiência Energética

De acordo com o que foi levantado no capítulo anterior, observa-se que a produção de biocombustíveis envolve também o uso de energia fóssil ao decorrer das etapas de produção, a começar pelas operações agrícolas – com uso de tratores, caminhões, entre outros – e, em seguida, a demanda energética presente nas usinas – seja para processos ou maquinários envolvidos (DÍAZ, 2011). Portanto, o uso de combustíveis fósseis e emissão de GEE nessas etapas podem ser analisados em relação às possibilidades de melhorias e inovações no setor.

Díaz (2011) realizou um estudo sobre o uso de recursos fósseis em cada bloco das etapas de produção de etanol, reforçando sobre a necessidade de garantir que o suprimento energético seja obtido de forma sustentável. Segundo a Análise do Ciclo de Vida (ACV)¹⁰, as etapas mais consumidoras de recursos não-renováveis são as atividades de plantio, manejo, colheita e produção na usina (**Tabela 5.1**).

Tabela 5.1 – Consumo de Recursos Não Renováveis na Produção de Etanol

Consumo de Recursos Não Renováveis	
ETAPA	kg de recurso/ha.ano
Plantio	2.624,1
Manejo	163,8
Colheita	98,2
Produção (Usina)	68,6
Distribuição	9
TOTAL	2.963,6

Adaptado de: DÍAZ (2011).

¹⁰ A ACV propõe o estudo de aspectos ambientais e impactos potenciais ao longo da vida de um produto, considerando desde a aquisição da matéria-prima, passando por produção, uso e disposição (ABNT, 2001).

O consumo de energia nas atividades, por sua vez, pode ser visualizado na **Tabela 5.2**, onde o maior resultado é na etapa de plantio (48%), em função da energia utilizada na produção dos fertilizantes, do calcário e do uso de maquinário nas operações agrícolas (DÍAZ, 2011).

Tabela 5.2 – Consumo de Energia Não Renovável na Produção de Etanol

Consumo de Energia Não Renovável		
ETAPA	MJ/ha.ano	%
Plantio	6.969,9	48%
Manejo	1.082,4	8%
Colheita	3.339,4	23%
Produção (Usina)	2.662,8	18%
Distribuição	349,3	2%
TOTAL	14.404	100%

Adaptado de: DÍAZ (2011).

A etapa da colheita está na sequência (23%), em segundo lugar, principalmente pela grande quantidade de energia investida no transporte da cana no percurso campo e usina. O processamento na usina também apresenta um consumo relevante (18%), devido ao processo de produção dos materiais de construção da usina e utilização de agentes químicos (DÍAZ, 2011).

Segundo Lee (2017), o maior consumo de energia está nas atividades de concentração do caldo e destilação, pontuando também a demanda de energia mecânica necessária para moagem e difusão. Todavia, o autor explica que, de certa forma, a cogeração de energia supre toda a demanda necessária na fase industrial, seja por energia mecânica, elétrica ou de calor – em usinas mais antigas ou modernas.

Ao contrário dos resultados acima, Lee (2017) complementa que as análises sobre o uso de energia geralmente consideram apenas a energia direta (visível e com custo financeiro), como óleo diesel e eletricidade. Insumos como adubos, tratores, caminhões, instalações e infraestrutura em geral costumam ser contabilizados somente do ponto de vista financeiro, sem analisar o quesito de energia.

No entanto, muita energia é necessária para a produção, movimentação e manutenção de todos os componentes que viabilizam o processo industrial. Sem que esta energia indireta

seja contabilizada, a energia aparente necessária para a produção pode se tornar subestimada, o que influenciaria favoravelmente os indicadores de sustentabilidade dos biocombustíveis – uma vez que, em geral, a energia indireta é mais significativa do que a energia direta (LEE, 2017).

Contabilizando a energia indireta dos prédios, equipamentos e insumos químicos necessários, considera-se que a fase industrial é praticamente autossuficiente, com contribuição da energia indireta menor do que na fase agrícola. Dois fatores interessantes para esse resultado: o transporte da biomassa fica alocado na fase agrícola e a entrega do etanol na de distribuição; a infraestrutura da indústria tem uma vida longa e de baixa manutenção, ao contrário dos equipamentos agrícolas, expostos ao clima e atividades mais bruscas (LEE, 2017).

Para entender sobre o potencial de eficiência energética do biocombustível, Macedo et al. (2008) e Malça e Freire (2006), sugerem que a avaliação da eficiência termodinâmica e da capacidade de renovação dos biocombustíveis seja estipulada pela razão entre o rendimento líquido e a energia consumida, ou seja, razão entre a energia renovável disponibilizada e a energia fóssil consumida.

Díaz (2011) acrescenta ainda que a eficiência energética do sistema produtivo pode explicitar se este é uma opção viável como fonte de energia, uma vez que os combustíveis são termicamente viáveis somente se fornecerem volume maior de energia do que a consumida em sua produção.

No que se refere às emissões de GEE e segundo o que foi apresentado desde o início, os biocombustíveis, incluindo o etanol, são levantados como uma alternativa para a redução das emissões. Durante o seu ciclo de produção, estima-se que todo o CO₂ absorvido na etapa agrícola é emitido à atmosfera nos próximos ciclos. Ao longo do ciclo produtivo, há queima de combustíveis fósseis, tanto direta como indiretamente e, conseqüentemente, emissão de CO₂ para a atmosfera (DÍAZ, 2011).

Cortez (2016) explica que etanol brasileiro obtido no processo de primeira geração é considerado um “*advanced biofuel*”, ou biocombustível avançado pela tradução livre, pois consegue reduzir em 61% as emissões de CO₂eq¹¹ em relação à gasolina pura. Para este índice, a produção do etanol e seu uso não pode emitir mais que 50% do CO₂eq, comparada à gasolina pura. Logo, a razão que define a eficiência energética final precisa ser maior do que 2,50, incluindo energia direta ou indireta. Isso porque o uso de combustível fóssil como fonte de energia no ciclo de vida do biocombustível não pode gerar CO₂ proporcional ao uso da energia fóssil demandada (LEE, 2017).

¹¹ Termo citado por Lee (2017) como: CO₂ e outros gases com efeito de aquecimento global equivalente ao CO₂.

Alguns estudos já realizados sobre a cana de açúcar explicam que a biomassa fornece um rendimento energético satisfatório, principalmente, pela grande produtividade por área na etapa agrícola, em conjunto com a eficiência baseada na utilização de subprodutos do processo (como o caso da vinhaça). BNDES e CGEE (2008) na publicação “Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável” reforçam que o fator importante neste sentido é o alto teor de açúcares da cana, que assegura a melhor conversão para o etanol – em comparação com outras biomassas (**Tabela 5.3**).

Tabela 5.3 – Eficiência Energética do Etanol para Diferentes Matérias-Primas

Matéria-Prima	Energia Renovável/Energia Fóssil Utilizada
Etanol de Milho (USA)	1,3
Etanol de Cana (Brasil)	8,9
Etanol de Beterraba (Alemanha)	2,0
Etanol de Sorgo Sacarino (África)	4,0
Etanol de Trigo (Europa)	2,0
Etanol de Mandioca	1,0

Adaptado de: Macedo (2007).

Segundo os resultados da literatura sobre a eficiência energética da cana de açúcar na produção de etanol, Lee (2017) reforça que não é correto comparar os índices de autores distintos, pois as análises podem partir de diferentes fronteiras de sistema e considerações. No entanto, é importante sinalizar sobre a existência de uma variação no indicador, que pode ir de 3,15 a 9,4 no mesmo tipo de estudo – onde Lee (2017) apresenta inclusive o resultado de 1,67.

Diversos autores incluem o uso de torta de filtro e de vinhaça como reaproveitamento em adubação, entretanto, as condições nem sempre são claramente declaradas (LEE, 2017). Para o resultado de 1,67, o autor não credita a energia disponível nestes subprodutos por falta de padronização de procedimentos e referências, por exemplo.

De qualquer forma, uma análise detalhada sobre as etapas de extração da matéria-prima e produção, abrangendo as energias diretas e indiretas (entradas), sugere a possibilidade de soluções no sentido de maior eficiência e otimização do processo. Portanto, a produção de etanol, apesar de já contribuir para o desenvolvimento de novas formas de energia, pode ser

complementada por outras tecnologias de produção que aumentem a eficiência energética e tornem o processo mais sustentável (LEE, 2017).

5.2. A Quarta Revolução no Setor Sucroenergético

Com a transição da terceira para a quarta revolução industrial, o setor sucroenergético também se mobiliza em relação ao desenvolvimento dos processos produtivos e à inserção de novas ferramentas. Venturelli (2015) constrói uma linha histórica apontando que no início da década de 80 os painéis de controle eletrônicos substituíram os pneumáticos, depois houve uma nova modificação na década de 90 para redes industriais e, recentemente, no início do século XXI, tem-se as usinas com centro de operações integrado, com redes de informação e controle.

Em suma, a agroindústria canavieira, em especial a produção de etanol, passa por cenário de expectativa em relação à maiores ganhos de produtividade e eficiência. Por um lado, há a pesquisa e inovação para disponibilidade de insumos, aperfeiçoamento de técnicas de cultivo, mecanização do plantio e corte da cana de açúcar. Por outro, apontam-se novos insumos industriais, desenvolvimento de equipamentos e rotas inovadoras para a produção do etanol (IPEA, 2016).

Neste trabalho, em vista dos principais desafios tecnológicos, parte-se de dois blocos determinantes para o desenvolvimento da produção de etanol: o agrônômico e o industrial. Para cada um desses dois âmbitos, constrói-se a seguir uma análise das mais relevantes “Soluções 4.0”, aquelas que visam a maior eficiência do setor com base nas tecnologias e ferramentas da Indústria 4.0.

5.2.1. Âmbito Agrônômico: Produção da Matéria-Prima e Soluções 4.0

Como apresentado anteriormente, as etapas que compõem a produção de etanol e que estão inseridas no âmbito agrônômico são as de Extração da Matéria-Prima, responsáveis por 79% do consumo de energia não renovável, mais especificamente: plantio, manejo e colheita. De forma resumida, de acordo com Díaz (2011), as principais atividades dessas etapas encontram-se na **Tabela 5.4**, em conjunto com os pontos mais relevantes no consumo de fontes não renováveis, seja por energia direta ou indireta (denominadas neste trabalho como entradas).

Tabela 5.4 – Principais Atividades da Extração da Matéria-Prima e as Entradas Não Renováveis

Etapas	Principais Atividades	Entradas
Plantio	Corte e escolha da muda, seleção da época de plantio, distribuição das mudas no sulco e diagnóstico da profundidade ideal para tal, aplicação de calcário e inseticidas, atividades de preparação do solo (aração, gradagem e subsolagem).	Máquinas, óleo diesel, herbicidas, calcário, fertilizantes, transporte de insumos, transporte da cana.
Manejo	Acompanhamento das propriedades físicas e químicas do solo, controle de plantas invasoras, de erosão e de pragas ou doenças, com aplicação de herbicidas, inseticidas, agrotóxicos e adubo.	Máquinas, óleo diesel, insumos agrícolas.
Colheita	Queima prévia ao corte, emprego de equipamentos como colhedoras, carregadoras ou reboque. Transporte da cana para a usina.	Máquinas, óleo diesel, transporte de cana.

Elaboração própria.

Um panorama dos últimos anos demonstra a introdução de novos dispositivos neste ambiente, como sensores, drones, sistemas de satélite – entre outras ferramentas que se baseiam em tecnologias da Indústria 4.0. Dito isso, diagnóstico e operações agrícolas inteligentes favorecem o maior entendimento sobre a produtividade, mudanças climáticas, propriedades do solo e incidência de pragas ou doenças. Os relatos estendem-se ainda para a atualização de tratores e máquinas com sistemas de monitoramento, operações remotas e acompanhemos em tempo real, o que promove a maior integração das atividades e reflete na diminuição de custos e em maior eficiência energética.

Observa-se que um dos fatores comuns à essas práticas agrícolas é a dependência de condições climáticas, por exemplo, uma vez que esta pode influenciar no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade – além de afetar também a relação das plantas com insetos e microrganismos, incidindo na ocorrência ou não de pragas e doenças (MASSRUHÁ; LEITE, 2017).

Como uma das soluções para este cenário, propõe-se o monitoramento agrometeorológico, onde a coleta contínua e sistemática de dados meteorológicos produz informações de interesse agrícola. Isso ocorre através de tecnologias de Internet das Coisas, Computação em Nuvem e Realidade Aumentada, por exemplo, responsáveis por estabelecer a comunicação entre as funções de coleta, transmissão e processamento de dados – o que possibilita a análise em tempo quase real. Diversas atividades agrícolas podem se beneficiar desse sistema, como: preparo do solo, semeadura, adubação, irrigação, colheita, etc. Ademais, análises sobre a produtividade, qualidade da produção e propensão à ocorrência de doenças também utilizam dados meteorológicos (MONTEIRO; OLIVEIRA, NAKAI, 2014).

Uma das alternativas mencionadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) nesse sentido é o Agritempo, sistema de informações agrometeorológicas que possibilita o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc), um instrumento de gestão de riscos na agricultura e política agrícola. Dessa forma, riscos relacionados a perdas agrícolas resultante de eventos climáticos são minimizados, permitindo também que cada região identifique a melhor época de plantio, nos diferentes tipos de solo e ciclos (MASSRUHÁ; LEITE, 2017).

Assim como as demais plantas, a cana desenvolve e produz biomassa e açúcar de acordo com as condições de temperatura, umidade do solo, precipitação, incidência de pragas e doenças. Tecnologias para a análise de condições climáticas podem fornecer informações em tempo real sobre a plantação, o que auxiliaria na tomada de decisão para as operações de plantio, manejo e colheita. Isso reduziria custo, tornaria as operações mais precisas e, conseqüentemente, reduziria os impactos das atividades agrícolas sobre o meio ambiente, uma vez que a necessidade de insumos agrícolas seria determinada com maior exatidão. Ademais, muitas operações mecanizadas são mais eficientes quando realizadas sob condições favoráveis, como as de preparo do solo e pulverização, sem mencionar o corte e transporte da matéria-prima.

Relata-se também o desenvolvimento de sistemas que se baseiam em dados geoespaciais – aqueles que informam as características espaciais da posição geográfica do fenômeno e a sua geometria. Algumas atividades que dependem desse tipo de pesquisa são: levantamento, caracterização e monitoramento de recursos naturais, avaliação de riscos climáticos, mapeamento de cobertura e uso da terra, análises socioeconômicas (ESQUERDO et al., 2014).

Como exemplo, cita-se o mapeamento através de imagens de satélites. O resultado é um maior conhecimento sobre a área disponível para a colheita, a taxa anual de renovação da cana, a área de expansão ou de retração da plantação, propriedades da planta (como irrigação),

monitoramento do histórico de mudança sobre o uso e cobertura da terra em função do cultivo (ESQUERDO et al., 2014).

Outro caso seria o das ferramentas computacionais que auxiliam no controle de pragas e doenças, o que reduz o tempo necessário para que as primeiras ações sejam implementadas. Como, por exemplo, uma infraestrutura para o diagnóstico de doenças de plantas via internet, possibilitando que uma melhor decisão durante o manejo dessas instabilidades (MASSRUHÁ; LEITE, 2017).

De forma complementar, destaca-se os produtos que auxiliam na calibração da pulverização de insumos que atuam no controle de pragas e doenças, o que torna o processo mais eficiente e evita o desperdício. Na prática, a aplicação é efetuada através de bicos de pulverização, onde a análise das gotas permite quantificar a eficiência da aplicação – a distribuição, o tamanho e o espectro das gotas são fatores que descrevem a avaliação do processo de pulverização. Sendo assim, aumenta-se a possibilidade do uso racional de agrotóxicos, reduzindo os danos ao ecossistema e os custos de produção (MASSRUHÁ; LEITE, 2017).

Um apontamento interessante seria em relação às colhedoras, uma das máquinas utilizadas na etapa de colheita, o consumo de diesel nesta etapa pode ser otimizado por meio de um sensor – o dispositivo especifica a velocidade ideal para o equipamento e com isso pode-se ajustar a variável para diminuir o consumo do combustível (SOUSA; LOPES; INAMASU, 2014).

Essas e outras iniciativas estão sintetizadas na **Tabela 5.5**, segundo as principais soluções encontradas e já utilizadas no âmbito agrônomo.

Tabela 5.5 – Síntese das Principais Soluções da 4.0 no Âmbito Agronômico e Oportunidades de Ganhos em Eficiência Energética

Principais Soluções 4.0 no Âmbito Agronômico	Exemplo de Caso	Impactos na Eficiência
Controle e Monitoramento de Operações Agrícolas à Distância	Detecção de falhas em tratores e redefinição de rotas em caso de eventos climáticos.	Acompanhamento inteligente dos parâmetros e condições do sistema agrícola. Por isso, melhor direcionamento de tratores, pulverizadores e colheitadeiras, portanto, menor consumo de combustível fóssil e de insumos.
Monitoramento Climático	Simulador para cenários de deficiência hídrica.	Identificação dos melhores períodos de plantio, menor consumo de água e menor necessidade de insumos.
Controle Inteligente da Plantação	Identificação de pragas, doenças, nível de irrigação e de nutrientes com auxílio de satélites ou drones.	Menor consumo de água e insumos.
Aplicação e Pulverização Inteligentes de Pesticidas	Aplicação direcionada de pesticida, com maior precisão e que atingem apenas o alvo selecionado.	Menor utilização de insumos.
Rastreamento do Transporte de Produtos	Eficiência na logística de transporte da cana de açúcar do campo até a indústria.	Monitoramento da localização em tempo real, definição da melhor rota, portanto, menor consumo de combustível fóssil.

Elaboração própria

5.2.2. Âmbito Industrial: Produção de Etanol e Soluções 4.0

De acordo com o que foi discutido anteriormente, a transformação da cana de açúcar em etanol envolve uma sequência de processos que dependem diretamente das propriedades da matéria-prima e definem a Etapa de Produção (Usina), relacionada ao âmbito industrial da cadeia produtiva – com 18% de consumo de energia não renovável.

Dentre as principais atividades, apontam-se: preparo da cana de açúcar, extração e tratamento do caldo, fermentação, destilação e cogeração de energia – resumidas na **Tabela 5.6** segundo suas principais atividades. Apesar de Díaz (2011) considerar como entradas o aço estrutural, o aço leve, o aço inoxidável, o cimento e os reagentes químicos, neste trabalho seguiu-se a análise de Lee (2017): entradas não especificadas, uma vez que a energia direta e indireta estrutural, dos equipamentos e de movimentação de material dentro da usina, além de transporte e contribuição humana, não são especificadas de forma detalhada nas publicações disponíveis.

Tabela 5.6 – Principais Atividades da Etapa de Produção (Usina) e as Entradas Não Renováveis

Etapas	Principais Atividades	Entradas
Preparo da Cana de Açúcar	Recebimento e descarga da cana, limpeza e submissão ao desfibrador.	Não Especificadas
Extração e Tratamento do Caldo	Recepção da matéria-prima previamente preparada, extração do caldo por moagem ou difusão, tratamento químico e aquecimento do caldo.	
Fermentação	Fermentação, centrifugação e aquecimento do produto resultante.	
Destilação	Destilação do caldo, com geração da vinhaça (subproduto).	
Cogeração de Energia	Geração de energia elétrica ou mecânica, para uso interno e venda do excedente.	

Elaboração própria.

Durante a pesquisa para a construção deste trabalho, não foram encontrados na literatura informações sobre exemplos de usinas de etanol brasileiras citadas como referência da digitalização e inclusão de ferramentas 4.0, já que o assunto ainda é bastante recente. Em relação a produção do biocombustível, observa-se que grande parte das inovações mencionadas estão acontecendo no âmbito agrônômico, o que traz reflexos diretos para a etapa de transformação da matéria-prima. Uma vez que o desenvolvimento de novas técnicas agrícolas tende a aumentar a eficiência energética da cadeia do etanol, além de incidir em uma matéria-prima com maior ATR.

Todavia, a digitalização da usina de etanol pode ser observada em comparação com outros setores e partindo de um ponto de vista comum do cenário industrial. Em suma, espera-se que as tecnologias possam ser aplicadas para um maior desenvolvimento do setor, proporcionando a otimização da produtividade. De uma forma geral, estudos apontam que as transformações acontecem associadas a mudanças como (GIMENEZ; SANTOS, 2019).

- a) ampliação da conectividade, com avanços nos sistemas de comunicações e redes, relacionado ao conceito de Internet das Coisas;
- b) maior atuação de sensores;
- c) acumulação e processamento de dados pelo Big Data;
- d) desenvolvimento da robótica, com maior capacidade em atividades autônomas e não somente rotineiras;
- e) avanços na inteligência artificial;
- f) desenvolvimento do *machine learning*.

Segundo Gimenez e Santos (2019), em função do processo de auto aprendizagem dos equipamentos, máquinas e sistemas, a produção se torna mais precisa e eficiente, possibilitando a redução de perdas de insumos (matéria-prima e energia). Portanto, para o tratamento da biomassa, pode-se citar a maior conexão dos sistemas, tornando-os descentralizados e virtualizados, o que possibilita um maior conhecimento sobre as variáveis na fase industrial e, com isso, maior produtividade e eficiência.

Nesse sentido, ainda de acordo com os autores, menciona-se também a redução de tempo, através da antecipação e identificação de acidentes, defeitos, desgastes – o que reduz o intervalo dispendido em manutenção e reprogramação de operações.

Quando ocorre a baixa de carga na moenda, os motores continuam com máxima carga, o que diminui a eficiência energética. Em análises sobre a contaminação no mosto, aguarda-se

resultados do laboratório, o que diminui o rendimento produtivo. Ou seja, as operações flutuantes, com alta variabilidade, demandam consumo contínuo de água, vapor, gases, ar comprimido e energia elétrica, refletindo no desperdício de insumos e emissão de CO₂ (VENTURELLI, 2015).

Outro ponto interessante é possibilidade de maior comunicação entre campo e indústria, via redes externas e internas (internet), permitindo a integração corporativa e, além disso, a integração da cadeia produtiva – com fornecedores, parceiros e inclusive consumidores. Com isso, tem-se um conhecimento prévio que adiciona maior flexibilidade na produção, possibilitando uma maior eficiência na logística (transportes e controle de estoques) (GIMENEZ; SANTOS, 2019).

No caso das colhedoras de cana, por exemplo, pode-se estabelecer um ritmo conforme o da indústria. Se uma esteira da usina na etapa de preparo sofre alguma parada, reduzindo o ritmo da moagem, a comunicação com o campo pode direcionar a colhedora e o caminhão de transporte de cana para uma região mais distante, que levará mais tempo para colher e transportar a cana até a indústria, o que evita filas de caminhões na usina (RAMOS, 2019). Por se tratar de um tema recente e que ainda requer P&D, as oportunidades de eficiência energética acerca dos processos industriais, dentro do contexto da indústria 4.0, não foram abordadas de forma detalhada neste trabalho. Grande parte das pesquisas e tecnologias já aplicadas se concentram no setor agrônômico.

CAPÍTULO VI CONCLUSÃO

6.1. Conclusões

Este trabalho aponta que o incentivo ao desenvolvimento sustentável e o uso de energia renovável são dois tópicos importantes dentro do panorama da Indústria Química para os próximos anos. Nesse sentido, produtos e processos podem ser reformulados e otimizados para poupar os recursos naturais e, portanto, gerar menos impacto ao meio ambiente. De forma mais específica, evidencia-se o papel da biomassa de cana-de-açúcar como uma fonte importante na matriz energética brasileira e com bastante potencial frente aos desafios da digitalização.

A Indústria 4.0, além das novas ferramentas, traz expectativas para o cenário da sustentabilidade. Com a digitalização, a promessa é de que haja uma maior eficiência energética dos processos e menor emissão de gases do efeito estufa – o que por si só já faz com que produção de etanol esteja no centro do assunto, pelo papel como energia renovável e substituição ao uso de fontes fósseis.

Do ponto de vista analisado neste trabalho, a produção do biocombustível é avaliada diante das possibilidades de eficiência energética da sua própria produção, com o advento de tecnologias 4.0, o que tornaria ainda mais viável a inserção do biocombustível na matriz energética. Dito isso, o estudo da cadeia produtiva do etanol está associado à dois grandes âmbitos: o agrônômico e o industrial. Nota-se que as etapas do primeiro grupo são responsáveis por 79% do consumo de energia não renovável empregada na produção do álcool. Por esse motivo, o âmbito é o mais significativo em termos de influência na eficiência energética, onde o industrial está na sequência, com 18% do consumo de energia não renovável na cadeia produtiva.

As diferenças para esses resultados são explicadas pelo emprego de contribuições indiretas de energia, não somente diretas. Três fatores interessantes colaboram para que a etapa industrial tenha uma necessidade fóssil mais baixa: o transporte da biomassa fica alocado na fase agrícola e a entrega do etanol na de distribuição; a infraestrutura da indústria tem uma vida longa e de baixa manutenção, ao contrário dos equipamentos agrícolas, expostos ao clima e atividades mais bruscas; a cogeração supre de forma efetiva a demanda energética dos processos industriais.

Os reflexos na P&D caminham em sentido favorável a esse resultado: a maioria das soluções 4.0 difundidas no cenário brasileiro estão sendo direcionadas para o âmbito agrônômico, o de maior consumo fóssil.

6.2. Sugestão de Trabalhos Futuros

De acordo com o que foi levando neste estudo, algumas sugestões de trabalhos futuros são propostas:

- i. Abordagem sob o ponto de vista do mercado de trabalho na Indústria 4.0, incluindo os impactos nas relações de emprego, a necessidade de novas capacitações e os reflexos trazidos para o meio acadêmico;
- ii. Aprofundamento específico na Usina 4.0, identificando as tecnologias já aplicadas e os casos em prática, pontuando os exemplos de soluções que vão além do âmbito agrônomico;
- iii. Análise do Ciclo de Vida partindo da utilização de ferramentas da Indústria 4.0 na produção etanol, propondo um comparativo entre os resultados de ACV (com e sem ferramentas 4.0);
- iv. Análise do âmbito agrônomico da produção de etanol, seus impactos sociais e ambientais (não somente em termos de eficiência energética), reforçando os desdobramentos, nesse mesmo sentido, em consequência do advento da Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Indústria 4.0 pode economizar R\$ 73 bilhões ao ano para o Brasil: os ganhos de eficiência produtiva correspondem a uma economia de R\$ 31 bilhões.** ABDI, 2017. Disponível em: <<https://www.abdi.com.br/postagem/industria-4-0-pode-economizar-r-73-bilhoes-ao-ano-para-o-brasil>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

_____. **Relatório Técnico de acompanhamento da política industrial, dezembro/2013-janeiro/2014.** Brasília: ABDI, 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/Wp2UFE>>. Acesso em: 21 jul. 2020.

ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial; MDIC – Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Agenda brasileira para a Indústria 4.0: O Brasil preparado para os desafios do futuro.** Site da Agenda Brasileira para a Indústria 4.0 divulgado em 2018. Disponível em: <<http://www.industria40.gov.br/>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química; DELOITTE. **Um outro futuro é possível: Perspectivas para o setor químico no Brasil.** ABIQUIM, 2018. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/br/Documents/energy-resources/Deloitte-Abiquim-Setor-Quimico-Relatorio.pdf> >. Acesso em: 25 jun. 2020.

ABNT – Associação Brasileira de Normas. **NBR ISO 14040. Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.** Rio de Janeiro: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001. p. 10. Disponível em: <<http://licenciadorambiental.com.br/wp-content/uploads/2015/01/NBR-14.040-Gest%C3%A3o-Ambiental-avaliac%C3%A3o-do-ciclo-de-vida-principios-e-estrutura.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2020.

AGÊNCIA BRASIL. **No Brasil 76% das indústrias aplicam economia circular, diz pesquisa.** Agência Brasil, 2019. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-09/no-brasil-76-das-industrias-aplicam-economia-circular-diz-pesquisa>>. Acesso em: 08 jul. 2020.

ANASTASIA. **Industry 4.0: Everything You Need To Know.** Cleverism, 2015. Disponível em: <<https://www.cleverism.com/industry-4-0-everything-need-know/>>. Acesso em: 17 set. 2019.

ANDERL, Reiner. **Industrie 4.0: Advanced Engineering of Smart Products and Smart Production.** Darmstadt, 2014. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/270390939_Industrie_40_-_Advanced_Engineering_of_Smart_Products_and_Smart_Production >. Acesso em: 27 set. 2019.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** ANEEL, Brasília, ed. 3, p. 236, 2008. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2008_AtlasEnergiaEletricaBrasil3ed/297ceb2e-16b7-514d-5f19-16cef60679fb>. Acesso em: 30 jun. 2020.

ANP – Agência Nacional do Petróleo. **Produção e Fornecimento de Biocombustíveis: Etanol.** ANP, 2016. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/etanol>>. Acesso em: 08 jul. 2020.

BARBIERI et al. **Inovação e Sustentabilidade: Novos Modelos e Proposições**. Separata de: Revista de Administração de Empresas, v. 50, n. 2, abr-jun, p.146-154, 2010. Disponível em: <scielo.br/scielo.php?pid=S003475902010000200002&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 11 abr. 2020.

BELARDO, Guilherme de Castro; CASSIA, Marcelo Tufaile; SILVA, Rouverson Pereira. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (Brasil); CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. ed 1. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2008. 314 p. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2002>>. Acesso em: 14 jul. 2020.

Boston Consulting Group – BCG. **Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries**. Disponível em: <https://www.bcg.com/pt-br/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx>. Acesso em: 20 set. 2019.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Nacional de Agroenergia: 2006-2011**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. Disponível em: <http://bbeletronica.sede.embrapa.br/bibweb/bbeletronica/2006/inst/inst_11.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2020.

_____. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Estudo de viabilidade técnica e econômica de um grupo selecionado de tecnologias inovadoras relacionadas à cadeia sucroenergética**. Brasília: Ceres Inteligência Financeira, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/jP60Gs>>.

BRETTEL, Malte. et al. **How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective**. International Journal of Information and Communication Engineering: World Academy of Science, Engineering and Technology, v. 8, n. 1, p. 37-44, 2014. Disponível em: <<https://waset.org/publications/9997144/how-virtualization-decentralization-and-network-building-change-the-manufacturing-landscape-an-industry-4.0-perspective>>. Acesso em: 27 set. 2019.

BSA, The Software Alliance. **Estudo da BSA ilustra o impacto mundial da revolução de dados**. BSA, 2015. Disponível em: <http://www.bsa.org/news-and-events/news/2015/october/en10202015datareport?sc_lang=pt-BR>. Acesso em: 03 dez. 2019.

BACCARIN, Artur Benzi. **Indústria 4.0: IoT, big data e produtos digitais**. Design de Produto na Era Digital, Unisul Virtual, 2018. Disponível em: <https://riuni.unisul.br/bitstream/handle/12345/5815/ARTIGO_ArturBaccarin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 03 dez. 2019.

CARVALHO, André; MONZONI, Mario. **Sustentabilidade: só um modismo?** Especial: energia e sustentabilidade. Separata de: *GV-executivo*, v. 9, n. 1, jan-jun, 2010. Disponível em: <<https://rae.fgv.br/gv-executivo/vol9-num1-2010/sustentabilidade-so-modismo>>. Acesso em: 01 jul. 2020.

CHAVES, Sidney. **A questão dos riscos em ambientes de computação em nuvem**. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12139/tde-01022012-183255/en.php>>. Acesso em: 08 dez. 2019.

CNI – Confederação Nacional da Indústria. **Desafios para a Indústria 4.0 no Brasil**. CNI, 2016a. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2016/8/desafios-para-industria-40-no-brasil/>>. Acesso em: 21 jun. 2020.

_____. **Sondagem Especial 66: Indústria 4.0: novo desafio para a indústria brasileira**. CNI, 2016b. Disponível em: <www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/sondesp-66-industria-4-0/>. Acesso em: 20 jun. 2020.

CNI DIGITAL – Plataforma Digital da Confederação Nacional da Indústria. **Conceitos: Robôs Autônomos (Séries “Pilares da Indústria 4.0”, Parte 2 de 9)**. CNI DIGITAL, 2017a. Disponível em: <<http://www.cnidigital.com.br/artigo/conceitos-robo-s-auto-nomos-s-ries-pilares-da-ind-stria-4-0-parte-2-de-9>>. Acesso em: 18 de jun. 2020.

_____. **“Hoje, a tecnologia já faz parte da Rotina das Nossas Cervejarias”**. CNI DIGITAL, 2017b. Disponível em: <<http://www.cnidigital.com.br/artigo/seguranca-ciberne-tica>>. Acesso em: 18 de jun. 2020.

_____. **Segurança Cibernética**. CNI DIGITAL, 2018. Disponível em: <<http://www.cnidigital.com.br/artigo/seguranca-cibernetica>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

_____. **Série Pilares da Indústria 4.0 (Parte 4 de 9) – Integração Horizontal e Vertical**. CNI DIGITAL, 2018. Disponível em: <<http://www.cnidigital.com.br/artigo/se-rie-pilares-da-indu-stria-4-0-parte-4-de-9-integra-o-horizontal-e-vertical>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

COELHO, Pedro Miguel Nogueira. **Rumo à Indústria 4.0**. Tese (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016. Disponível em: <<https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/36992/1/Tese%20Pedro%20Coelho%20Rumo%20%C3%A0%20Industria%204.0.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2019.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana de Açúcar**. Monitoramento agrícola – Cana-de-açúcar, v. 7, safra 2020/21, n. 1. Primeiro levantamento, maio de 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 08 jul. 2020.

CORRÊA, Jorge; VISOLI, Marcos. **Computação em nuvem: entendendo e implementando uma nuvem privada**. Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, 2011. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/921220/1/doc116.pdf>>. Acesso: 08 dez. 2019.

CORTEZ, Luíz Augusto Barbosa. **Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro**. FAPESP, São Paulo, SP, 2016, p. 225. Disponível em: <<https://www.ib.usp.br/mais-noticias/2276-universidades-e-empresas-40-anos-de-ciencia-e-tecnologia-para-o-etanol-brasileiro.html>>. Acesso em: 14 jul. 2020.

DELOITTE. **Industry 4.0. Challenges and solutions for the ditigal transformation and use of exponencial Technologies**. Suíça, 2015. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/manufacturing/ch-en-manufacturing-industry-4-0-24102014.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2020.

DÍAZ, Marco Antônio. **Análise do Ciclo de Vida do Etanol Brasileiro Visando à Certificação Ambiental**. Rio de Janeiro, 2011. 115 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Técnico Científico, Pontífica Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/18555/18555_1.PDF>. Acesso em: 08 jul. 2020.

ENGEMA – Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. **Meio Ambiente**, 2016. Disponível em: <<http://engemausp.submissao.com.br/18/anais/arquivos/115.pdf>>. Acesso em: 08 jul. 2020

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2019: Relatório Síntese/Ano Base 2018**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso em: 30 jun. 2020.

ESQUERDO, Júlio César Dalla Mora; CRUZ, Sergio Aparecido Braga da; MACÁRIO, Carla Geovana do Nascimento; ANTUNES, João Francisco Gonçalves.; SILVA, João dos Santos Vila da; COUTINHO, Alexandre Camargo. Tecnologias da informação aplicadas aos dados geoespaciais. In: MASSRUHÁ, Silvia Maria Fonseca Silveira; LEITE, Maria Angelica de Andrade; LUCHIARI JUNIOR, Ariovaldo; ROMANI, Luciana Alvim Santos. (Ed.). **Tecnologias da informação e comunicação e suas relações com a agricultura**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Cap. 8. p. 139-156. Disponível em: <<http://www.participa.br/cpiot/objetivos-da-consulta>>. Acesso em: 23 jul. 2020.

FACCIONI FILHO, Mauro. **Internet das Coisas**. Universidade do Sul de Santa Catarina. Livro Digital. UnisulVirtual. Palhoça, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Mauro_Fazion_Filho/publication/319881659_Internet_das_Coisas_Internet_of_Things/links/59c038d5458515e9cfd54ff9/Internet-das-Coisas-Internet-of-Things.pdf>. Acesso em: 21 set. 2019.

FAPESP – Academia Brasileira de Ciências e a Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho**, 2010. Disponível em: <<http://www.fapesp.br/publicacoes/energia.pdf>>. Acesso em 05 jul. 2020.

FARIA, José Henrique de. **Por uma teoria crítica da sustentabilidade**. Separata de: *Organizações e Sustentabilidade*, Londrina, v. 2, n. 1, p. 2-25, jan./jun, 2014. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/ros/article/viewFile/17796/15172>>. Acesso em 28 jun. 2020.

FIEP - Federação das Indústrias do Estado do Paraná. **Logística reversa e economia circular em foco na indústria**, 2019. Disponível em:<fiepr.org.br>. Acesso em: 19 jun. 2020.

FIRJAN – Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. **Panorama da Inovação: Indústria 4.0**. Publicação FIRJAN, Cadernos SENAI de Inovação, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-inovacao/industria-4-0-1.htm>>. Acesso em: 27 set. 2019.

FIRJAN – Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro; FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos. **Indústria 4.0 no Brasil: oportunidades, perspectivas e desafios**. FIRJAN; FINEP, 2019. Disponível em: <<https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes->

de-inovacao/industria-4-0-no-brasil-oportunidades-perspectivas-e-desafios.htm>. Acesso em: 20 jun. 2020.

FOSTER, Allan; ROBERTO, Samanta Souza; IGARI, Alexandre Toshiro. **Economia circular e resíduos sólidos: uma revisão sistemática sobre a eficiência ambiental e econômica**. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE (ENGEMA), 2016. Disponível em: <<http://engemausp.submissao.com.br/18/anais/arquivos/115.pdf>>. Acesso em: 08 jul. 2020.

FRANCE, André Luiz Rua. **Diretrizes Da Sustentabilidade Nas Edificações e as Certificações** – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10008229.pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2020.

FUGITA, Renan Augusto. **Desidratação e retificação de etanol produzido a partir da amêndoa do caroço da manga**. 2014. 56 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/115846>>. Acesso em: 11 jul. 2020.

GIMENEZ, Denis Maracci; SANTOS, Anselmo Luís dos. **Indústria 4.0, manufatura avançada e seus impactos sobre o trabalho**. Mapa da Educação Profissional e Tecnológica no Brasil – Mercado de Trabalho e Dinâmica Ocupacional, CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Texto para Discussão. Unicamp. IE, Campinas, n. 371, 2019. Disponível em: <<https://www.eco.unicamp.br/images/arquivos/artigos/TD/TD371.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2020.

GIORDANO, Caio Mezzeti; ZANCUL, Eduardo de Senzi; RODRIGUES, Vinícius Picanço. **Análise dos Custos da produção por Manufatura Aditiva em Comparação a Métodos Convencionais**, Revista Produção Online, Florianópolis, SC, v. 16, n. 2, p. 449-523, abr./jun, 2016. Florianópolis, 2016. Disponível em: <<https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/1963/1397>>. Acesso em: 25 dez. 2019.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energias renováveis: um futuro sustentável**. Revista USP, n. 72, p. 6-15, 1 fev. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i72p6-15>>. Acesso em: 11 jul. 2020.

GONÇALVES, Eder. **Indústria 4.0: qual é o impacto no mercado de trabalho?** Publicado em 2018. Disponível em: <<https://avozdaindustria.com.br/industria-40-totvs/industria-40-qual-o-impacto-no-mercado-de-trabalho>>. Acesso em: 19 Ago 2020.

GREENPEACE. **[R]evolução Energética mostra como o Brasil dará adeus às fontes fósseis de energia**, 2016. Disponível em: <https://storage.googleapis.com/planet4-brasil-stateless/2018/07/Relatorio_RevolucaoEnergetica2016_completo.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2020.

HEATH, Tom; BIZER, Christian. **Linked Data: Evolving the Web into a Global Data Space** (1st edition). Synthesis Lectures on the Semantic Web: Theory and Technology. Morgan & Claypool Publishers, 2011. Disponível em: <<https://info.sice.indiana.edu/~dingying/Teaching/S604/LODBook.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2019.

HERMANN, Mario. PENTEK, Tobias. OTTO, Boris. **Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review**. Audi Stiftungslehrstuhl Supply Net Order Management, Fakultät Maschinenbau, Technische Universität Dortmund, 2015. Disponível em:

<http://www.iim.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2019.

IAC – Inter Academy Council. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho.** Traduzido por Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP. São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.fapesp.br/publicacoes/energia.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2020.

IEDI, Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial. **Indústria 4.0: a Quarta Revolução Industrial e os Desafios para a Indústria e para o Desenvolvimento Brasileiro.** IEDI, 2017. Disponível em: <https://iedi.org.br/artigos/top/estudos_industria/20170721_iedi_industria_4_0.html>. Acesso em: 18 out. 2019.

_____. **Industrialização e crescimento inclusivo em meio à robotização.** IEDI, 2018. Disponível em: <https://iedi.org.br/artigos/top/analise/analise_iedi_20180215_industria.html#>. Acesso em: 20 jun. 2020.

INTEL, Integrated Electronics Corporation. **Big Data 101: Unstructured Data Analytics A Crash Course on the IT Landscape for Big Data and Emerging Technologies,** 2012. Disponível em: <<http://www.intel.com/content/www/us/en/big-data/unstructured-data-analytics-paper.html>>. Acesso em 03 dez. 2019.

_____. **Saiba mais sobre Big Data: Medidas que Gerentes de TI Podem Tomar para Avançar com o Software Apache Hadoop.** INTEL, 2013. Disponível em: <<https://www.intel.com.br/content/dam/www/public/lar/br/pt/documents/articles/90318386-1-por.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2019.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Políticas de incentivo à inovação tecnológica no Brasil.** Julho, 2008. Disponível em: <<repositorio.ipea.gov.br>>. Acesso em: 02 jul. 2020.

_____. **Quarenta anos de etanol em larga escala no Brasil: desafios, crises e perspectivas.** 315 p. Brasília: Ipea, 2016. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/160315_livro_quarenta_anos_etanol.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2020.

I-SCOOP. **Industry 4.0: the fourth industrial revolution – guide to Industrie 4.0.** I-SCOOP, 2017. Disponível em: <<https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/>>. Acesso em: 17 set. 2019.

KALEYDOS. **Economia circular: o que é e como aplicar ao seu negócio de impacto,** 2019. Disponível em: <<http://kaleydos.com.br/economia-circular-em-negocios-de-impacto/>>. Acesso em: 07 jul. 2020.

KIRNER, Claudio. **Fundamentos de realidade aumentada.** Documento da Conferência, 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/216813361_Fundamentos_de_Realidade_Aumentada>. Acesso em: 22 ago. 2020.

KIRNER, Claudio; SISCOOTTO, Robson. **Realidade Virtual e Aumentada: Conceitos, Projeto e Aplicações.** Livro do Pré-Simpósio, IX Symposium on Virtual and Augmented Reality. Editora Sociedade Brasileira de Computação – SBC, Petrópolis, 2007. Disponível em: <http://de.ufpb.br/~labteve/publi/2007_svrps.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2020.

LANDELL, Marcos et al. **Manejo varietal em cana-de-açúcar: aspectos teóricos e aplicação de conceitos.** In: BELARDO, G. C.; CASSIA, M. T.; DA SILVA, R. P. Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar. p. 273-288. Piracicaba: SBEA, 2015.

LEE, Lisiong Shu. **Sustentabilidade Energética do Etanol de Primeira Geração no Brasil: Uma Releitura Crítica de Referenciais Metodológicos.** Tese (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/9651/LEE_Lisiong_2018.pdf?sequence=4&isAllowed=y>. Acesso em: 14 jul. 2020.

LEITE, Rogério; CORTEZ, Luís. **O Etanol Combustível no Brasil. Ministério das Relações Exteriores - MRE (Org.). Biocombustíveis no Brasil: realidades e perspectivas.** Brasília: Arte Impressora Gráfica LTDA, 2008. p. 60-75. Disponível em: <https://www.agencia.cnpq.br/Repositorio/etanol3_000g7gq2cz_702wx5ok0_wtedt_3_xdrmfk.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2020.

LIMA, Raquel Araújo. **A produção de energias renováveis e o desenvolvimento sustentável: uma análise no cenário da mudança do clima,** 2012. Disponível em: <<https://periodicos.ufrn.br/direitoenergia/article/download/5145/4126/>>. Acesso em 05 jul. 2020.

LOPES, Maurício Antônio. **Agro na economia circular, 2019.** Separata de: Revista Globo Rural, 2019. Disponível em: <<https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Agricultura/noticia/2019/01/agro-na-economia-circular.html>>. Acesso em: 24 jul. 2020.

LOUREIRO, Ramon; VERÍSSIMO, João Paulo. **A engenharia química no contexto da indústria 4.0: estudo de caso em uma usina de etanol.** Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Química e de Petróleo. Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2018. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/handle/1/6983>>. Acesso em: 12 abr. 2020.

MACEDO, Isaias. **Situação atual e perspectivas do etanol.** Estudos Avançados, São Paulo, v. 21, n. 59, jan./abr. p.157-165, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142007_000100012&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 14 jul. 2020.

MACEDO, Isaias; SEABRA, Joaquim; SILVA, João. **Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020.** Biomass and Bioenergy, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953407002310>>. Acesso em: 14 jul. 2020.

MALÇA, João; FREIRE, Fausto. **Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl tertiary butyl ether (bioETBE): Assessing the implications of allocation.** Energy, v. 31, n. 15, p. 3362-3380, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2S4JXPS3B2/2/533577d_49841cfefe20d8_d10_cec7886b>. Acesso em: 14 jul. 2020.

MARQUES, Pedro Valentim. **Custo de produção agrícola e industrial de açúcar e álcool no Brasil na safra 2007/2008.** Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. 2009. 194 p. Relatório apresentado a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA. Disponível em:

<https://www.udop.com.br/download/estatistica/publicacoes/pecege_17032010_1456.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2020.

MASSRUHÁ, Silvia Maria Fonseca Silveira; LEITE, Maria Angelica de Andrade. **Agro 4.0 – Rumo à Agricultura Digital**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa, 2017. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/166203/1/PL-Agro4.0-JC-na-Escola.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2020.

MCKINSEY - McKinsey & Company. **Digital in chemicals: From technology to impact**. MCKINSEY, 2017. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/digital-in-chemicals-from-technology-to-impact#>>. Acesso em: 25 jun. 2020.

MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Recursos Aplicados - Indicadores Consolidados**. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/indicadores/detalhe/recursos_aplicados/indicadores consolidados/2_1_3.html>. Acesso em: 20 jun. 2020.

MDIC - Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Competitividade Industrial – Energia**. MDIC, 2018. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/competitividade-industrial/acoes-e-programas/9-assuntos/categ-comercio-exterior/599-energia>>. Acesso em: 30 jun. 2020.

MENEZES, Uiara Gonçalves de et al. **Gestão da Inovação para o desenvolvimento sustentável: Comportamento e Reflexões sobre a Indústria Química**. RAI Revista de Administração e Inovação, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S180920391630451X>>. Acesso em 02 jul. 2020.

MINERVA, Roberto; BIRU, Abyi; ROTONDI, Domenico. **Towards a Definition of the Internet of Things (IoT)**. Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, IEEE, – Italia, 2015. Disponível em: <https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2019.

MOKYR, Joel; STROTZ, Robert. Northwestern University. **The Second Industrial Revolution, 1870-1914**. Publicado em 1998. Disponível em: <<http://faculty.wcas.northwestern.edu/~jmokyr/castronovo.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2019.

MONTEIRO, José Eduardo Boffino de Almeida; OLIVEIRA, Aryeverton Fortes de; NAKAI, Alan Massaru. TIC em agrometeorologia e mudanças climáticas. In: MASSRUHÁ, Silvia

MORAES, Marcelo Lopes; BACCHI, Mirian Rumenos Piedade. **Etanol: do início às fases atuais de produção**. Revista de Política Agrícola, ano XXIII, n. 4, p. 5-22, out./nov./dez. 2014. Disponível em: <<https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/950>>. Acesso em: 21 jul. 2020.

MOURA, Marina Palma de. **A quarta revolução industrial e os desafios para a indústria e para o desenvolvimento brasileiro**. Florianópolis, 2018. Departamento de Economia e Relações Internacionais, Centro Socioeconômico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/188622/Monografia%20Marina%20Palma%20de%20Moura.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 20 set. 2010

NETO RIBEIRO, Albino. **Pesquisa Descritiva da Inovação Tecnológica para Simulação em Realidade Virtual e Aumentada sob a Perspectiva da Indústria 4.0 e os Sistemas Virtuais de Produção**. Rio de Janeiro, 2018. 321 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luis Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/document/s2/doutorado/2018-1/3087-neto-ar-td-18>>. Acesso em: 17 jun. 2020.

NOZATO, Carina et. al. **Moenda x Difusor: diferentes pontos de vista sobre o assunto**. Bioenergia em Revista: Diálogos 2011. Disponível em: <<http://fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/article/view/20>>. Acesso em: 15/07/2020.

NREL – NATIONAL RESEARCH RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Cellulosic ethanol**. Golden: NREL, 2007. Disponível em: <<http://goo.gl/awKaP>>. Acesso em: 21 jul. 2020.

NUNES, Elias Fernando. **Cana-de-açúcar: A produção de etanol e seus benefícios, 2017**. Disponível em: <<https://brt.ifsp.edu.br/phocadownload/userupload/213354/IFMAN170005%20CANA%20DE%20ACAR%20A%20PRODUO%20DE%20ETANOL%20E%20SEUS%20BENEFICIOS.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2020.

OMETTO, Aldo Roberto. **Avaliação do Ciclo de Vida do Álcool Etilico Hidratado Combustível pelos Métodos EDIP, Exergia e Emergia**. São Carlos, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<https://smastr16.blob.core.windows.net/etanolverde/cicloDeVidaAlcool.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2020.

PACTO GLOBAL. **Relatório Anual Rede Brasil do Pacto Global, 2018**. Disponível em: <https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/89484/1564498031Pacto_Global_-_Relatrio_2018_final.pdf> Acesso em: 03 abr. 2020.

PAIVA, Luciana. **Plantio de cana na Índia, segundo maior produtor de cana do mundo, 2014**. Disponível em: <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/plantio-de-cana-na-india-segundo-maior-produtor-de-cana-do-mundo.html>>. Acesso em: 21 ago 2020.

PEREIRA, Bruno Alves. **Agroindústria canavieira: uma análise sobre o uso da água na produção sucroalcooleira**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <<http://goo.gl/CBD5bq>>. Acesso em: 21 jul. 2020.

PINSKY, Vanessa Cuzziol et al. **Inovação sustentável: uma perspectiva comparada da literatura internacional e nacional**. Separata de: *Revista de Administração e Inovação*, São Paulo, v. 12, n.3 p. 226-250, jul./set. 2015. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/rai/article/view/101486>>. Acesso em: 02 jul. 2020.

RAMOS, Camila Souza. **São Martinho inaugura era dos canaviais 4.0**. Valor Econômico – Agronegócios, 2019. Disponível em: <<https://valor.globo.com/agronegocios/noticia/2019/08/05/sao-martinho-inaugura-era-dos-canaviais-4-0.ghtml>>. Acesso em: 25 jul. 2020.

RAMOS, Pedro; SZMRECSÁNYI, Tamás. **Evolução histórica dos grupos empresariais da agroindústria canavieira paulista**. História Econômica e História de Empresas, v. 5, n. 1, p. 85-115, 2002. Disponível em: <<https://www.hehe.org.br/index.php/rabphe/article/view/132>>. Acesso em: 21 jul. 2020.

RODRIGUES, Letícia Francischini; JESUS, Rodrigo de Aguiar. SCHÜTZER, Klaus. **Indústria 4.0 – Uma Revisão da Literatura**. Revista de Ciência e Tecnologia, Piracicaba: UNIMEP, v. 19, n. 38, 2016. Disponível em: <<https://www.metodista.br/revistas/revistas-unimep/index.php/cienciatecnologia/article/view/3176/1899>>. Acesso em: 26 set. 2019.

RODRÍGUEZ, Mauro Francisco. **Uso de Água na Produção de Etanol de Cana-de-açúcar**. Campinas, 2010. Tese (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/265125/1/ChavezRodriguez_MauroFrancisco_M.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2020.

ROSSETTO, Raffaella. **Queima**. EMBRAPA, 2007. Agência de Informação Embrapa. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_92_22122006154841.html>. Acesso em: 14 jul. 2020.

ROSSETTO, Raffaella; SANTIAGO, Antônio. **Preparo do solo**. EMBRAPA, 2007a. Agência de Informação Embrapa. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_20_711200516716.html>. Acesso em: 14 jul. 2020.

_____. **Rotação e reforma**. EMBRAPA, 2007b. Agência de Informação Embrapa. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_75_22122006154841.html>. Acesso em: 14 jul. 2020.

SABO, Filip. **Industry 4.0 – A Comparison of the Status in Europe and the USA**. Austrian Maschall Plan Foundation, Kufstein University of Applied Sciences, Kufstein, 2015. Disponível em: <<https://www.pac.gr/bcm/uploads/industry-4-0-a-comparison-of-the-status-in-europe-and-usa.pdf>> Acesso em: 26 mar. 2019.

SALLA, Diones Assis et al. **Avaliação energética da produção de etanol utilizando como matéria-prima a cana-de-açúcar**. Ciência Rural. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), v. 39, n. 8, p. 2516-2520, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/8779>>. Acesso em: 11 jul. 2020.

SANCHES, Bianca C; CARVALHO, Emily S; GOMES, Fabio Fonseca Barbosa. **A indústria 4.0 e suas contribuições à sustentabilidade**. Separata de: *Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada UNG-Ser*. Universidade UNIVERITAS/UNG 49 Grupo Ser Educacional V.2, N.1, 2018. Disponível em: <<http://revistas.ung.br/index.php/engenhariaetecnologia/article/view/3673/2663>>. Acesso em: 03 abr. 2020.

SANTESSO, Bruno Henrique de Carvalho. **Sustentabilidade e empreendedorismo: Um estudo da correlação entre os fatores**. Monografia (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180830/tce-03082012-144604/?&lang=br>>. Acesso em: 03 abr. 2020.

SANTOS, Fernando; BORÉM, Aloízio; CALDAS, Celson. **Sugarcane: Bioenergy, Sugar and Ethanol – Technology and Prospects**. Brasília: Mapa; Viçosa, MG: Editora da UFV.

SANTOS, Hugo. **Robótica Probabilística Aplicada a uma Unidade Autônoma para Intervenções em Poços de Petróleo**. Rio de Janeiro, 2016. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontífica Universidade

Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2016. Disponível em: <http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/1321760_2016_completo.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2020.

SAS, Statistical Analysis System Institute. **Machine Learning: o que é e qual sua importância?** Disponível em: <https://www.sas.com/pt_br/insights/analytics/machine-learning.html#machine-learningimportance>. Acesso em: 22 ago. 2020.

SEIXAS, Mario Alves; CONTINI, Elísio. **Internet das Coisas (IoT): Inovação para o Agronegócio**. Diálogos Estratégicos, Brasília. Embrapa, 2017. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/192513/1/Internet-das-coisas-1.pdf>>. Acesso em 22 ago. 2020.

SHIKIDA, Pery Francisco Assis; AZEVEDO, Paulo Furquim; VIAN, Carlos Eduardo de Freitas. **Desafios da agroindústria canavieira no Brasil pós-desregulamentação: uma análise das capacidades tecnológicas**. Revista de Economia e Sociologia Rural, Piracicaba, São Paulo, v. 49, n. 3, p. 599-628, jul./set. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032011000300004>. Acesso em: 21 jul. 2020.

SILVEIRA, Maria Fonseca; LEITE, Maria Angelica de Andrade; LUCHIARI JUNIOR, Ariovaldo; ROMANI, Luciana Alvim Santos. (Ed.). **Tecnologias da informação e comunicação e suas relações com a agricultura**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Cap. 7. p. 121-138. CONSULTA Pública Plano Nacional de IoT. Participa.Br. 2016. Disponível em: <<http://www.participa.br/cpiot/objetivos-da-consulta>>. Acesso em: 23 jul. 2020.

SOUSA, Rafael Vieira de; LOPES, Wellington Carlos; INAMASU, Ricardo Yassushi. Automação de máquinas e implementos agrícolas: eletrônica embarcada, robótica e sistema de gestão de informação. In: MASSRUHÁ, Silvia Maria Fonseca Silveira; LEITE, Maria Angelica de Andrade; LUCHIARI JUNIOR, Ariovaldo; ROMANI, Luciana Alvim Santos. (Ed.). **Tecnologias da informação e comunicação e suas relações com a agricultura**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Cap. 8. p. 139-156. Disponível em: <<http://www.participa.br/cpiot/objetivos-da-consulta>>. Acesso em: 23 jul. 2020.

TERTULIANO, Ian; CÂMARA, Marina; SZANO, Victor. **Indústria 4.0: A inovação aliada a sustentabilidade**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.pucsp.br/sites/default/files/download/eventos/bisus/14-industria_inovacao_infraestrutura.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2020.

UNICAMP; CGEE. **Bioetanol combustível: uma oportunidade par o Brasil**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Publica em: 2009. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/5Bioetanol+de+Cana+de+A%C3%A7ucar+2009_6407.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2020.

UNIVERSIDADE CORNELL; INSEAD – Instituto Europeu de Administração de Empresas; OMPI – Organização Mundial da Propriedade Intelectual. **Índice Global de Inovação de 2018: Energizando o Mundo com Inovação**. Publicado em: 2018. Ithaca, Fontainebleau e Genebra. Disponível em: <https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/pt/wipo_pub_gii_2018-abridged1.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2020.

UNIVERSIDADE CORNELL; INSEAD; ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA PROPRIEDADE INTELECTUAL. **Índice Global de Inovação de 2019: Criar Vidas Sadias - O Futuro da**

Inovação Médica. 12ª ed. Ithaca, Fontainebleau e Genebra, 2019. 144 p. Disponível em: <https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/pt/wipo_pub_gii_2019.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2020.

VENTURELLI, Márcio. **Usina 4.0: A Quarta Revolução Industrial no Setor Bioenergético.** Automação Industrial, 2015. Disponível em: <<https://www.automacaoindustrial.info/usina-4-0-a-quarta-revolucao-industrial-no-setor-bioenergetico/>>. Acesso em: 21 jul. 2020.

VILELA, Frederico Sampaio Vasconcelos. **Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar. Estudo de Caso: Usina Jalles Machado S/A.** Tese (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/13361>>. Acesso em: 14 jul. 2020.