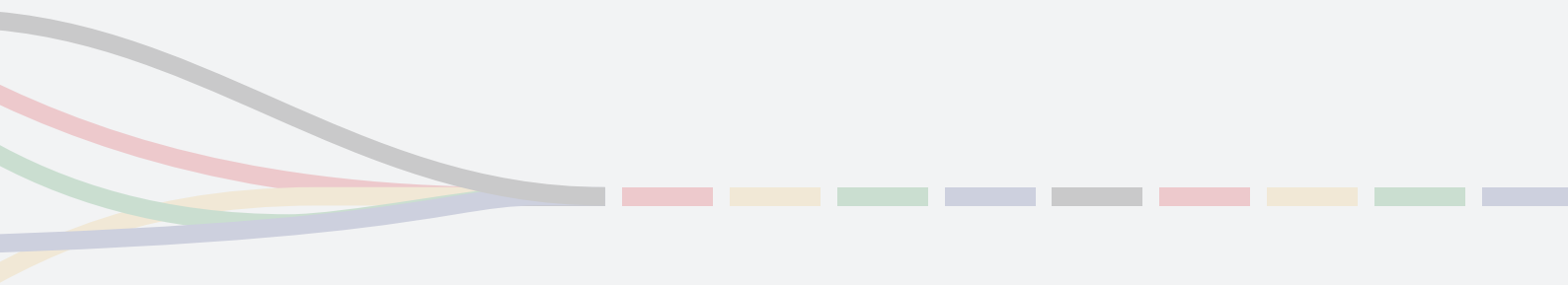


Potencial de diferentes indústrias no Brasil para produzir gás de síntese



ProQR

COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS
SEM IMPACTOS CLIMÁTICOS

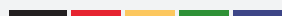


Todas as indicações, dados e resultados deste estudo foram compilados e cuidadosamente revisados pelos(as) autores(as). Apesar disso, podem ocorrer erros com relação ao conteúdo. Dessa forma, nem a GIZ nem os(as) autores(as) podem ser responsabilizados(os) por qualquer reivindicação, perda ou prejuízo, direto ou indireto, resultante do uso ou da confiança depositada sobre as informações contidas neste estudo que sejam, direta ou indiretamente, resultante dos erros, imprecisões ou omissões de informações.

As ideias e opiniões expressas nesta publicação são dos(as) autores(as) e não refletem necessariamente a posição do Ministério do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU), ou da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

A duplicação ou reprodução do todo ou de partes do estudo (incluindo a transferência de dados para sistemas de armazenamento de mídia) e distribuição para fins não comerciais são permitidas, desde que a GIZ seja citada como fonte da informação. Para outros usos comerciais, incluindo duplicação, reprodução ou distribuição do todo ou de partes desta publicação, é preciso de autorização escrita da GIZ.

*As figuras são adaptadas das fontes bibliográficas.



Publicado por

ProQR – Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos

Cooperação Técnica Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações - MCTI

Ministro

Marcos Pontes

Secretário de Empreendedorismo e Inovação

Paulo César Rezende De Carvalho Alvim

Diretor de Tecnologias Estruturantes

Eduardo Soriano Lousada

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit - GIZ

Diretor Nacional

Michael Rosenauer

Diretora de Projetos

Tina Ziegler

Diretor substituto do ProQR

Marcos de Oliveira Costa

Direção do ProQR

Eduardo Soriano Lousada (MCTI)

Tina Ziegler (GIZ)

Participantes do Trabalho

MCTI

Rafael Silva Menezes

Gustavo de Lima Ramos

GIZ

Marcos de Oliveira Costa

Elizabeth Melo

Empresa de Pesquisa

Energética - EPE

Juliana Rangel do Nascimento

Elaboração Técnica

Aschkan Davoodi Memar

Revisão de técnica

Elizabeth Melo

Juliana Rangel do Nascimento

Marcos de Oliveira Costa

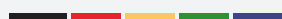
Revisão de texto e tradução

Ana Terra Mejia Munhoz

Projeto gráfico e diagramação

João Bosco Gouvea Ramos

Julho 2021



Contatos

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
Coordenação-Geral de Estratégias e Negócios
Departamento de Tecnologias Estruturantes
Secretaria de Empreendedorismo e Inovação
Esplanada dos Ministérios - Bloco E - Sala 346
70.067-900, Brasília-DF, Brasil
+55 61 2033-7817

Deutsche Gesellschaft für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
SCN Quadra 1 Bloco C Sala 1401 - 14º andar
Ed. Brasília Trade Center
70711-902 Brasília-DF, Brasil
+55 61 2101-2170

Este estudo foi elaborado no âmbito do Projeto Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos (ProQR), realizado por meio da Cooperação Técnica Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável, em parceria com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Este projeto é parte da Iniciativa Internacional para o Clima (IKI), apoiada pelo Ministério do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU), com base em decisão do Parlamento alemão.

O Projeto ProQR tem o objetivo de criar um modelo de referência internacional para combustíveis alternativos sem impactos ambientais, para transporte aéreo e setores sem potencial de eletromobilidade.

Resumo

Com a crescente demanda por serviços de transporte aéreo e a consequente elevação do tráfego aéreo global registrado a cada ano, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) provavelmente aumentarão rapidamente no longo prazo. Para cumprir as metas climáticas internacionais estabelecidas pelo Acordo de Paris de 2015, o setor de aviação estabeleceu objetivos ambiciosos de redução de emissões de GEE em direção à neutralidade de carbono. Uma solução promissora para descarbonizar o setor de aviação e cumprir os compromissos internacionais e nacionais é o uso de Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF, na sigla em inglês), como o querosene Power-to-Liquid (PtL). Para reduzir as emissões da aviação no Brasil, a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH e o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), em nome do Ministério Alemão do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMU), lançou o projeto Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos, também denominado ProQR, em 2017.

Este estudo aborda o potencial de diferentes indústrias brasileiras para produzir gás de síntese a fim de estimar o potencial de produção de SAF/PtL por meio do processo de Fischer-Tropsch (FT). Também é apresentado um panorama detalhado de diferentes indústrias e suas fontes de matéria-prima adequadas para a produção de gás de síntese, em particular as indústrias de soja, biodiesel, cana-de-açúcar, etanol, milho, arroz, aço, cimento e celulose.

As indústrias selecionadas foram analisadas em termos de seus processos de produção e seus resíduos e subprodutos de baixo valor para determinar seu potencial anual de produção de gás de síntese por meio de um processo de conversão. Verificou-se que as indústrias de soja, milho e cana-de-açúcar apresentam o maior potencial de produção de gás de síntese, seguidas dos segmentos de aço, celulose, cimento, etanol, arroz e biodiesel. Em seguida, os potenciais foram mapeados por região e estado por meio de um sistema de informações geográficas que permitiu a identificação de possíveis localidades para plantas de SAF. Constatou-se que a região Centro-Oeste, em especial o estado de Mato Grosso, e a região Sudeste, principalmente os estados de São Paulo e Minas Gerais, têm o maior potencial para a produção de gás de síntese e as localidades mais adequadas para as plantas de SAF.

Este estudo mostra que a produção anual brasileira de SAF pode chegar a 193 milhões de litros se considerarmos o potencial de produção de gás de síntese de todos os segmentos da indústria. A localização geográfica do Brasil, que favorece o uso de fontes renováveis de energia, combinada com os achados sobre o potencial de produção anual de SAF pelo país, parece oportunizar o estabelecimento do amplo papel do querosene PtL no setor de aviação brasileiro.

Sumário

1. Introdução	16
1.1. Motivação	16
1.2. Metodologia	19
2. Estado da arte	22
2.1. Combustíveis alternativos para o setor de aviação	22
2.2. Produção de gás de síntese	23
2.2.1. Produção indireta de gás de síntese	25
2.2.1.1. <i>Produção de dióxido de carbono</i>	25
2.2.1.2. <i>Produção de hidrogênio</i>	28
2.2.1.3. <i>Produção de gás de síntese por eletrólise co-SOEC</i>	29
2.2.2. Produção direta de gás de síntese	30
2.2.2.1. <i>Gaseificação de biomassa</i>	30
2.2.2.2. <i>Reforma de metano</i>	34
2.2.2.3. <i>Gaseificação e reforma do glicerol</i>	35
3. Potenciais matérias-primas para a produção de gás de síntese no Brasil	37
3.1. Fontes de matéria-prima para a produção direta de gás de síntese	37
3.2. Fontes de matéria-prima para a produção indireta de gás de síntese	37
3.3. Priorização e seleção de indústrias para a produção de gás de síntese	40
3.4. Análise das indústrias selecionadas	42
3.4.1. Indústria de cimento	42
3.4.1.1. <i>Processo de produção de cimento e seus subprodutos e resíduos</i>	43
3.4.1.2. <i>Fluxo de massa da produção de cimento industrial com subprodutos e resíduos</i>	45
3.4.2. Indústria siderúrgica	45
3.4.2.1. <i>Processo de produção de aço e seus subprodutos e resíduos</i>	46
3.4.2.2. <i>Fluxo de massa da produção de aço industrial com subprodutos e resíduos</i>	48
3.4.3. Indústria de papel e celulose	49
3.4.3.1. <i>Processo de produção de celulose e seus subprodutos e resíduos</i>	49
3.4.3.2. <i>Fluxo de massa da produção de celulose industrial com subprodutos e resíduos</i>	52
3.4.4. Agroindústria	52
3.4.4.1. <i>Indústria de cana-de-açúcar</i>	53

3.4.4.2. Indústria de soja	56
3.4.5. Indústria de milho	60
3.4.6. Indústria de arroz	62
4. Potencial das indústrias brasileiras selecionadas para produzir gás de síntese	63
4.1. Indústria de cimento	63
4.1.1. Estimativa de subprodutos e resíduos	64
4.1.2. Produção de gás de síntese	65
4.2. Indústria siderúrgica	68
4.2.1. Estimativa de subprodutos e resíduos	69
4.2.2. Produção de gás de síntese	70
4.3. Indústria da cana-de-açúcar	72
4.3.1. Resíduos agrícolas	72
4.3.1.1. Estimativa de resíduos	72
4.3.1.2. Produção de gás de síntese	72
4.3.2. Indústria de bioetanol	75
4.3.2.1. Estimativa de subprodutos e resíduos	75
4.3.2.2. Produção de gás de síntese	75
4.4. Indústria da soja	78
4.4.1. Resíduos agrícolas	78
4.4.1.1. Estimativa de resíduos	78
4.4.1.2. Produção de gás de síntese	78
4.4.2. Indústria de biodiesel	81
4.4.2.1. Estimativa de subprodutos e resíduos	82
4.4.2.2. Produção de gás de síntese	82
4.5. Indústria de milho	84
4.5.1. Estimativa de resíduos	84
4.5.2. Produção de gás de síntese	84
4.6. Indústria de arroz	87
4.6.1. Estimativa de resíduos	87
4.6.2. Produção de gás de síntese	87
4.7. Indústria de celulose	90
4.7.1. Estimativa de subprodutos e resíduos	91

4.7.2. Produção de gás de síntese	92
4.7.2.1. <i>Cascas e resíduos de madeira</i>	92
4.7.2.2. <i>Lodo de fábrica de papel</i>	93
4.7.2.3. <i>Dióxido de carbono</i>	93
4.8. Análise das indústrias quanto a seu potencial de produzir gás de síntese e possíveis locais para a geração de combustível de aviação PtL	95
4.8.1. Produção potencial de gás de síntese	95
4.8.2. Possíveis locais para a produção de combustíveis sustentáveis de aviação	97
5. Conclusão e pesquisas futuras	102
5.1. Conclusão	102
5.2. Limitações e estudos futuros	103
6. Referências	104
7. Anexo	113

Lista de figuras

Figura 1: Metas de redução de emissões de GEE do setor de aviação. Fonte: DENA (2019b)	17
Figura 2: Mapa do Brasil dividido em regiões e estados. Fonte: elaboração própria	19
Figura 3: Metodologia de cinco etapas dividida em níveis nacional e regional. Fonte: elaboração própria	20
Figura 4: Metodologia para identificação e seleção de indústrias para produção de gás de síntese. Fonte: elaboração própria	20
Figura 5: Metodologia para determinação e mapeamento do potencial de produção de gás de síntese. Fonte: elaboração própria	21
Figura 6: Abordagem descentralizada para a produção de SAF pelo ProQR. Fonte: GIZ (2020)	23
Figura 7: Produtos finais do gás de síntese. Fonte: Aberg (2014)	24
Figura 8: Sistema simplificado de captura direta do ar da Climeworks (n.d.)	26
Figura 9: Principais sistemas de captura de CO ₂ . Fonte: IPCC (2015) and Ketzer et al. (2014)	27
Figura 10: Princípio de funcionamento da eletrólise co-SOEC. Fonte: Wang et al. (2016)	29
Figura 11: Etapas da gaseificação da biomassa. Fonte: adaptado de Garcia et al. (2019) and Carvalho et al. (2019)	31
Figura 12: Gaseificador simplificado de leito fluidizado. Fonte: Chhiti & Kemiha (2013).	31
Figura 13: Gaseificador simplificado de fluxo arrastado. Fonte: Chhiti & Kemiha (2013).	32
Figura 14: Avaliação das indústrias quanto à sua existência num futuro descarbonizado. Fonte: elaboração própria	40
Figura 15: Processo industrial convencional de uma fábrica integrada de produção de cimento. Fonte: elaboração própria	43
Figura 16: Fluxo de massa de um processo industrial integrado de produção de cimento. Fonte: elaboração própria	45
Figura 17: Processo de alto-forno convencional integrado para produção de aço no Brasil. Fonte: elaboração própria	46
Figura 18: Fluxo de massa de um processo convencional de fabricação de aço em alto-forno no Brasil. Fonte: elaboração própria	48

Figura 19: Processo kraft simplificado de produção de papel e celulose. Fonte: elaboração própria	50
Figura 20: Fluxo de massa de uma fábrica de celulose kraft a partir de eucalipto na América do Sul. Fonte: elaboração própria	52
Figura 21: Esquema simplificado de um processo de conversão de cana-de-açúcar industrial típico de primeira geração. Fonte: adaptado de Dias et al. (2015) e Fritsche et al. (2016)	53
Figura 22: Esquema simplificado da indústria da soja e processo interligado de produção industrial do biodiesel. Fonte: elaboração própria	57
Figura 23: Reação de transesterificação de triglicerídeos em biodiesel e glicerol. Fonte: adaptado de Leoneti et al. (2012)	59
Figura 24: Esquema simplificado da indústria do milho com seus subprodutos e resíduos adequados. Fonte: adaptado de Fritsche et al. (2016)	61
Figura 25: Esquema simplificado da indústria do arroz com seus subprodutos e resíduos adequados. Fonte: elaboração própria	62
Figura 26: Distribuição da indústria brasileira de cimento por plantas integradas e não integradas. Fonte: Visado & Pecchio (2019)	63
Figura 27: Potencial da indústria de cimento para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria	67
Figura 28: Potencial da indústria de cimento para produzir gás de síntese por estado e por distribuição de plantas integradas. Fonte: elaboração própria	67
Figura 29: Distribuição da indústria siderúrgica brasileira. Fonte: IABr (2019)	68
Figura 30: Potencial da indústria siderúrgica para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria	71
Figura 31: Potencial da indústria siderúrgica para produzir gás de síntese por estado e distribuição de plantas. Fonte: elaboração própria	71
Figura 32: Produção potencial regional de gás de síntese a partir de resíduos agrícolas da cana-de-açúcar. Fonte: elaboração própria	74
Figura 33: Produção potencial de gás de síntese a partir da conversão da palha de cana-de-açúcar por estado. Fonte: elaboração própria	74
Figura 34: Potencial da indústria de bioetanol para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria	77
Figura 35: Potencial da indústria de bioetanol para produzir gás de síntese por estado e distribuição de plantas. Fonte: elaboração própria	77

Figura 36: Produção potencial regional de gás de síntese a partir de resíduos agrícolas da soja. Fonte: elaboração própria	80
Figura 37: Produção potencial de gás de síntese a partir da conversão da palha de soja por estado. Fonte: elaboração própria	80
Figura 38: Distribuição da indústria brasileira de biodiesel em 2018. Fonte: ANP (2019)	81
Figura 39: Potencial da indústria de biodiesel para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria	83
Figura 40: Potencial da indústria de biodiesel para produzir gás de síntese por estado e distribuição de plantas. Fonte: elaboração própria	83
Figura 41: Potencial da indústria do milho para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria	86
Figura 42: Produção potencial de gás de síntese a partir da conversão de palha de milho por estado. Fonte: elaboração própria	86
Figura 43: Potencial da indústria do arroz para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria	89
Figura 44: Produção potencial de gás de síntese a partir de resíduos agrícolas de arroz por estado. Fonte: elaboração própria	89
Figura 45: Distribuição da indústria brasileira de papel e celulose. Fonte: IBÁ (2019)	90
Figura 46: Potencial da indústria de celulose para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria	94
Figura 47: Potencial da indústria de celulose para produzir gás de síntese por estado. Fonte: elaboração própria	95
Figura 48: Indústria da soja com possível hotspot para resíduos e locais importantes para a produção de SAF. Fonte: elaboração própria	98
Figura 49: Indústria de cana-de-açúcar com possível hotspot para resíduos e locais importantes para a produção de SAF. Fonte: elaboração própria	98
Figura 50: Indústrias cimenteira e siderúrgica com locais importantes para a produção de SAF. Fonte: elaboração própria	99
Figura 51: Captura detalhada de possíveis locais para plantas de produção de SAF em Minas Gerais. Fonte: elaboração própria	100
Figura 52: Indústria de milho e arroz com possíveis hotspots de resíduos e locais importantes para a produção de SAF. Fonte: elaboração própria	101

Lista de quadros

Tabela 1: Rotas de produção de combustível de aviação aprovadas pela ASTM. Fonte: adaptado de Carvalho et al. (2019) e Ebner (2018)	22
Tabela 2: Lista de produtos finais da síntese química de gás de síntese e seus requisitos para a razão H_2/CO . Fonte: adaptado de Aberg (2014)	24
Tabela 3: Requisitos do gás de síntese para o processo de FT. Fonte: adaptado de Allegue e Hinge (2012)	25
Tabela 4: Consumo de energia, eficiência e TRL de tecnologias de eletrólise da água. Fonte: adaptado de DENA (2019b) e DVWG (2018)	29
Tabela 5: Parâmetros dos gaseificadores de leito fluidizado e de fluxo arrastado. Fonte: adaptado de DVWG (2018)	33
Tabela 6: Principais processos de reforma de metano com suas reações de gás de síntese e entalpias. Fonte: adaptado de Aberg (2014)	34
Tabela 7: Processos de conversão do glicerol	35
Tabela 8: Fontes de matéria-prima para a conversão direta de gás de síntese e seus processos de conversão. Fonte: elaboração própria	37
Tabela 9: Fontes de matéria-prima para a conversão indireta de gás de síntese e suas fontes de emissão. Fonte: elaboração própria	38
Tabela 10: Matriz de avaliação para a seleção das indústrias adequadas para este estudo. Fonte: elaboração própria	41
Tabela 11: Parcela das emissões de CO_2 nas etapas de produção do cimento. Fonte: adaptado de Visado e Pecchio (2019)	45
Tabela 12: Processos siderúrgicos utilizados no Brasil em 2018. Fonte: IABr (2019)	46
Tabela 13: Fatores para a geração da palha da cana-de-açúcar. Fonte: elaboração própria	54
Tabela 14: Uso de matéria-prima brasileira para produção de etanol em 2018. Fonte: adaptado de Barros & Flake (2019)	55
Tabela 15: Fatores para a geração de palha de soja	58
Tabela 16: Participação das matérias-primas na produção de biodiesel no Brasil em 2018. Fonte: adaptado de ANP (2019)	58
Tabela 17: Teor de glicerol do óleo de soja em diferentes plantas de produção de biodiesel. Fonte: Nda-Umar et al. (2019) and Quispe et al. (2013)	60

Tabela 18: Fatores para a geração de palha de milho	61
Tabela 19: Fatores para a geração de palha e casca de arroz	62
Tabela 20: Produção de cimento e emissões de CO ₂ estimadas por região e estado. Fonte: SNIC (2018) e elaboração própria	64
Tabela 21: Produção de gás de síntese da indústria de cimento por região e estado. Fonte: elaboração própria	66
Tabela 22: Produção brasileira de aço bruto e emissões estimadas de CO ₂ por região e estado. Fonte: IABr (2019) e elaboração própria	69
Tabela 23: Produção de gás de síntese da indústria siderúrgica por região e estado. Fonte: elaboração própria	70
Tabela 24: Estimativa de resíduos agrícolas e produção potencial de gás de síntese da indústria de cana-de-açúcar por região e estado. Fonte: IBGE (2019) e elaboração própria	73
Tabela 25: Potencial da indústria de bioetanol para produzir gás de síntese a partir das emissões estimadas de CO ₂ por região e estado. Fonte: ANP (2019) e elaboração própria	76
Tabela 26: Estimativa de resíduos agrícolas e produção potencial de gás de síntese da indústria da soja por região e estado. Fonte: IBGE (2019) e elaboração própria	79
Tabela 27: Potencial da indústria de biodiesel para produzir gás de síntese por região e estado. Fonte: dados de produção anual da ANP (2019) e elaboração própria	82
Tabela 28: Estimativa de resíduos agrícolas e produção potencial de gás de síntese da indústria do milho por região e estado. Fonte: dados de produção anual do IBGE (2019) e elaboração própria	85
Tabela 29: Estimativa de resíduos agrícolas e produção potencial de gás de síntese da indústria do arroz por região e estado. Fonte: dados de produção anual do IBGE (2019) e elaboração própria	88
Tabela 30: Produção brasileira de celulose por região e estado em 2018. Fonte: dados de produção anual da EPE	91
Tabela 31: Estimativa de subprodutos e resíduos da produção brasileira de celulose em 2018. Fonte: dados de produção anual da EPE e elaboração própria	92
Tabela 32: Produção potencial e total de gás de síntese na indústria de celulose. Fonte: elaboração própria	93
Tabela 33: Potencial de diferentes indústrias para produzir gás de síntese, seus subprodutos e resíduos, e sua demanda de energia para a conversão de gás de síntese. Fonte: elaboração própria	96
Tabela 1. Fatores de conversão para diferentes resíduos industriais	113
Tabela 2. LHV de diferentes resíduos	114

Lista de siglas

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
Abiarroz	Associação Brasileira da Indústria do Arroz
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais <i>American Society for Testing and Materials</i>
BEN	Balanco Energético Nacional
BF-BOF	Alto-forno integrado – forno básico a oxigênio <i>Integrated blast furnace–basic oxygen furnace</i>
BMU	Ministério Alemão do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear <i>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CaCO₃	Carbonato de cálcio
CaO	Cal (óxido de cálcio)
CCGI	Ciclo combinado com gaseificação integrada
CCS	Captura e armazenamento de carbono <i>Carbon capture and storage</i>
CCU	Captura e utilização de carbono <i>Carbon capture and utilization</i>
CDA	Captura direta do ar
CH₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
COP	Conferência das Partes
CORSIA	Sistema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional <i>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation</i>
DDGS	Grãos secos de destilaria com solúveis <i>Distiller's dried grains and solubles</i>
DLR	Centro Aeroespacial Alemão <i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
DME	Dimetil éter
DR	Disponibilidade do resíduo
EOF	Forno de energia otimizada <i>Energy optimizing furnace</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
FEA	Forno elétrico a arco

Fe₂O₃	Óxido de ferro
Fe₃O₄	Minério de ferro
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FT	Fischer-Tropsch
GEE	Gases de efeito estufa
GIZ	Deutsch Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GNS	Gás Natural Sintético
H₂	Hidrogênio
H₂O	Água
HEFA	Ácidos graxos e ésteres hidroprocessados <i>Hydroprocessed esters and fatty acids</i>
IABr	Instituto Aço Brasil
IATA	Associação Internacional de Transporte Aéreo <i>International Air Transport Association</i>
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	Agência Internacional de Energia <i>International Energy Agency</i>
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
KIT	Instituto de Tecnologia de Karlsruhe <i>Karlsruhe Institute of Technology</i>
LHV	Menor valor de aquecimento <i>Lower heating value</i>
LSPA	Levantamento Sistemático da Produção Agrícola
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MEA	Tecnologia de monoetanolamina
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
OACI	Organização da Aviação Civil Internacional
PEM	Membrana de troca de prótons <i>Proton Exchange Membrane</i>
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel
Proálcool	Programa Nacional do Alcool
ProQR	Projeto Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
QGIS	Sistema Quantim de Informação Geográfica <i>Quantum Geographic Information System</i>
RSU	Resíduos sólidos urbanos

RWGS	Reação de mudança do vapor de água <i>Reverse Water-Gas Shift reaction</i>
SAC	Secretaria de Aviação Civil
SAF	Combustíveis Sustentáveis de Aviação <i>Sustainable Aviation Fuels</i>
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SOEC	Célula eletrolítica de óxido sólido <i>Solid oxide electrolysis cell</i>
TGRBF	Top Gas Recycling Blast Furnace
TRL	Nível de Maturidade Tecnológica <i>Technology Readiness Level</i>
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UnB	Universidade de Brasília

1. Introdução

Em nome do Ministério Alemão do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMU), a Deutsch Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH e o Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) criaram o projeto Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos, também denominado ProQR, em 2017. O ProQR tem como objetivo reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) da aviação utilizando combustíveis alternativos, também chamados de Combustíveis Sustentáveis de Aviação Power-to-Liquid (PtL SAF). Além disso, o projeto visa criar um modelo de referência internacional para a aplicação de combustíveis alternativos sem impactos climáticos em setores de transporte aéreo sem potencial para o desenvolvimento da eletromobilidade. Para atingir esse objetivo, o projeto inclui quatro componentes: Plantas de Demonstração, Enquadramento Geral, Capacitação de Recursos Humanos e Divulgação (GIZ, 2020).

O elemento-chave do projeto ProQR será uma planta-piloto no Brasil para a produção de SAF com base no processo de Fischer-Tropsch (FT). O MCTI e a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) são os parceiros de implementação. No setor público brasileiro, os mais importantes parceiros são o MCTI, a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e o Ministério de Minas e Energia (MME), em conjunto com a ANP, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Ministério do Meio Ambiente (MMA), a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e a Secretaria de Aviação Civil (SAC). O Centro Aeroespacial Alemão (DLR, na sigla em alemão) está contribuindo substancialmente para o projeto. E existem também parceiros acadêmicos, como a Universidade de Brasília (UnB) e outros *stakeholders*.

1.1. Motivação

Com a atual tendência global de crescimento econômico e populacional, é inevitável o aumento da demanda energética e material no futuro próximo. Como a sociedade está desenvolvida com grande dependência de energias, combustíveis, produtos químicos e materiais fósseis, o mundo em breve enfrentará enormes desafios decorrentes não apenas do consumo extensivo, mas também da questão da segurança energética. A produção de vultosas quantidades de resíduos e o contínuo aumento das emissões antrópicas de GEE são alguns desses desafios.

Para lidar com essa questão, 187 países estabeleceram uma meta comum na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima em 2015 (COP21): manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2°C até 2050 em comparação com os níveis pré-industriais (IPCC, 2019). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), a adoção imediata de novas tecnologias e soluções inovadoras, como energia neutra em carbono e sistemas eficientes de gestão de resíduos, é indispensável para cumprir essa meta de temperatura (DENA, 2019b; IPCC, 2019). Portanto, um forte processo de descarbonização e a adoção de conceitos sustentáveis, como o de economia circular, são imprescindíveis em diversos setores. Este estudo foca os dados e as potencialidades relacionadas ao setor de aviação (DENA, 2019a; Garcia et al., 2019).

Em 2017, esse setor respondeu por 3% das emissões globais de GEE: um total de 859 milhões de toneladas de CO₂ (DENA, 2019a). Com a crescente demanda por serviços de transporte aéreo e o aumento anual de aproximadamente 5% no tráfego aéreo global, as emissões de GEE em todo o mundo provavelmente vão se intensificar rapidamente no longo prazo (DENA, 2019b). Considerando esse cenário, a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA, na sigla em inglês) apresentou um plano de proteção climática: aumentar a eficiência de combustível em cerca de 1,5% por ano, alcançar a neutralidade de carbono nas viagens aéreas até 2020 e reduzir pela metade as emissões líquidas de CO₂ até 2050 em comparação a 2005 (IATA, 2021).

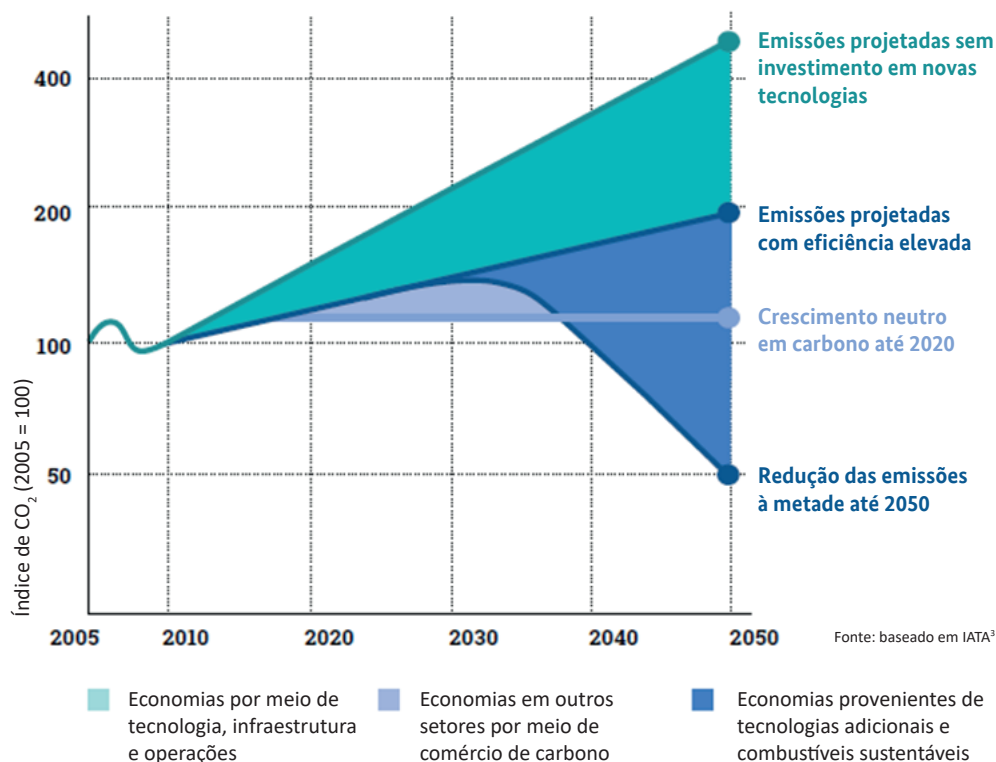


Figura 1: Metas de redução de emissões de GEE do setor de aviação. Fonte: DENA (2019b)

Embora essa agenda possa ser alcançada por meio do aumento da eficiência, esse aumento não seria suficiente para reduzir pela metade as emissões até 2050, como pode ser visto na Figura 1. Esforços e ações relacionados ao uso de novas tecnologias e, principalmente, de combustíveis alternativos têm se mostrado cruciais e necessários no longo prazo (DENA, 2019b). A fim de alcançar um crescimento neutro em carbono até 2020, a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) implementou o Plano de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA, na sigla em inglês), que visa estabilizar as emissões de CO₂ da aviação internacional até que os efeitos das novas tecnologias adotadas possam ser notados e analisados. De 2021 a 2026, apenas países voluntários estarão sujeitos aos requisitos de compensação do CORSIA; porém, a partir de 2027, projetos de compensação de carbono serão obrigatórios para todos os voos internacionais (DENA, 2019a).

A neutralidade de carbono só poderá ser alcançada no longo prazo se novas tecnologias forem adotadas, paralelamente à substituição do combustível de aviação de origem fóssil (*jet fuel*) por combustíveis alternativos e sustentáveis. Combustíveis alternativos são combustíveis sintéticos obtidos de energia renovável, água e dióxido de carbono. Soluções como uso de hidrogênio ou bateria elétrica estão sendo pesquisadas e desenvolvidas, mas ainda é im-

provável que essas tecnologias possam substituir totalmente a infraestrutura existente. Devido aos elevados requisitos de segurança e proteção no setor de aviação, aos altos custos de investimento e à longa vida útil dos aviões, o SAF é necessário para reduzir as emissões de CO₂ pela geração atual de frotas (DENA, 2019b).

A solução mais atrativa para descarbonizar o setor de aviação e o fator-chave para atingir as metas climáticas é o uso de combustíveis Power-to-X (PtX) (Carvalho et al., 2019; DVWG, 2018).¹ A produção de combustível por síntese de FT, utilizando gás de síntese como principal intermediário, é uma opção promissora, pois sua mistura ao combustível de aviação convencional já está certificada e, portanto, não há demanda de novos investimentos em infraestrutura. Será possível utilizar a infraestrutura existente mantendo a capacidade para atender a demanda cada vez maior do setor de aviação (DENA, 2019b). A descarbonização desse setor não apenas reduz os impactos e as consequências no campo da mudança climática, mas também garante a rentabilidade das companhias aéreas, visto que futuramente elas poderão ser cobradas, por meio do CORSIA, por suas emissões de carbono.

No Brasil, a demanda por combustíveis de aviação vem aumentando muito. Segundo a EPE, esse crescimento vai passar de 7,2 milhões de toneladas em 2018 para 14,8 milhões de toneladas em 2050 (Araujo, 2019). Enquanto a demanda por combustíveis de aviação em 2050 mais do que dobra, a produção permanece quase constante, o que resulta no crescimento da importação desses combustíveis. Além dessa tendência, o Brasil tem os maiores gastos com combustível de aviação do mundo, principalmente devido às suas regiões remotas, como o estado do Amazonas (GIZ & MCTIC, 2019). O projeto ProQR foi lançado considerando essa particularidade e o crescimento neutro em carbono do setor de aviação.

O Brasil é considerado um país propício para produzir PtL principalmente devido à sua situação geográfica favorável em termos de fontes renováveis. O potencial de geração de energia fotovoltaica em todo o país, os constantes ventos na região Nordeste e a ampla disponibilidade de recursos dão ao Brasil a chance de ser o primeiro distribuidor de combustíveis PTL no mundo. Além disso, a vasta experiência do país em bioenergia e biocombustíveis o torna um importante *player* potencial para produzir PtL para o setor de aviação. O combustível produzido no Brasil pode ser usado, primeiro, para suprir a demanda nacional e substituir as importações de combustível. Depois, pode ser exportado para países dispostos a pagar pelo combustível neutro em carbono, como os países da Europa. A Figura 2 mostra o mapa do Brasil com suas cinco principais regiões, seus 26 estados e o Distrito Federal.

1. Os combustíveis PtX podem ser definidos como combustíveis sintéticos produzidos com eletricidade renovável. Eles podem ser divididos em combustíveis Power-to-Gas (PtG) e Power-to-Liquid (PtL) (DVWG, 2018).



Figura 2: Mapa do Brasil dividido em regiões e estados. Fonte: elaboração própria

É importante saber qual matéria-prima usar para produzir combustíveis PtL de forma sustentável. Para contribuir com a redução das emissões de GEE, a geração de CO₂ deve ser evitada na produção de combustíveis PtL (DENA, 2019b). Portanto, a matéria-prima deve ser, ela própria, neutra em carbono ou composta de resíduos inevitáveis, como subprodutos e resíduos industriais. A utilização de subprodutos e resíduos industriais adequados para produzir SAF incentiva o conceito de biorrefinaria e uma relação cooperativa entre empresas e indústrias conhecida como simbiose industrial (Aberg, 2014; Patricio et al., 2017). Esses subprodutos e resíduos são convertidos em produtos de alto valor agregado que, além de aumentar a economia geral e a eficiência da indústria, garantem a transição para uma economia circular (Garcia et al., 2019).

Neste estudo, o potencial de diferentes segmentos da indústria brasileira de produzir gás de síntese é investigado para então estimar o potencial teórico de gerar PtL SAF no país. Esse gás é o intermediário inicial na síntese de FT e pode ser obtido por meio da conversão de diferentes matérias-primas. Este projeto visa gerar combustível PtL de forma sustentável utilizando subprodutos e resíduos de baixo valor da indústria brasileira, uma solução que não requer mudanças nos processos industriais convencionais. Para determinar o potencial dos segmentos da indústria brasileira de produzir gás de síntese, foi desenvolvida a metodologia detalhada na próxima seção.

1.2. Metodologia

A metodologia desenvolvida para este estudo é mostrada na Figura 3. Ela possui três etapas principais (em azul), seguidas por duas etapas adicionais (em cinza), que levam a informações adicionais sobre o potencial brasileiro de produzir combustíveis PtL em níveis regional e nacional.

Na primeira etapa, foram identificadas e selecionadas as indústrias capazes de produzir gás de síntese no Brasil. Com base em revisão de literatura, um método cascata foi desenvolvido para identificar fontes estacionárias para a conversão direta e indireta de gás de síntese em nível nacional (Figura 4). Em seguida, foi aplicada uma matriz de avaliação para auxiliar na seleção dos setores industriais contemplados neste estudo.

Na segunda etapa, cada indústria foi analisada individualmente quanto aos seus processos convencionais e foram definidos os subprodutos e resíduos adequados.



Figura 3: Metodologia de cinco etapas dividida em níveis nacional e regional. Fonte: elaboração própria



Figura 4: Metodologia para identificação e seleção de indústrias para produção de gás de síntese. Fonte: elaboração própria

Na terceira etapa, foi mapeado o potencial de produção de gás de síntese de cada indústria em nível regional. Uma avaliação por região e estado foi feita conforme mostrado na Figura 5. Primeiramente, os subprodutos e resíduos selecionados foram determinados ou estimados por região e estado com o apoio da base de dados da EPE ou de fatores adicionais identificados na literatura. Depois, sua produção potencial de gás de síntese foi calculada usando um processo de conversão tomado como referência. Além disso, foram coletadas informações sobre requisitos, demanda de energia e localização das plantas industriais. Com essas informações, a produção potencial de gás de síntese pôde ser mapeada por região e estado usando um sistema de informações geográficas (QGIS).

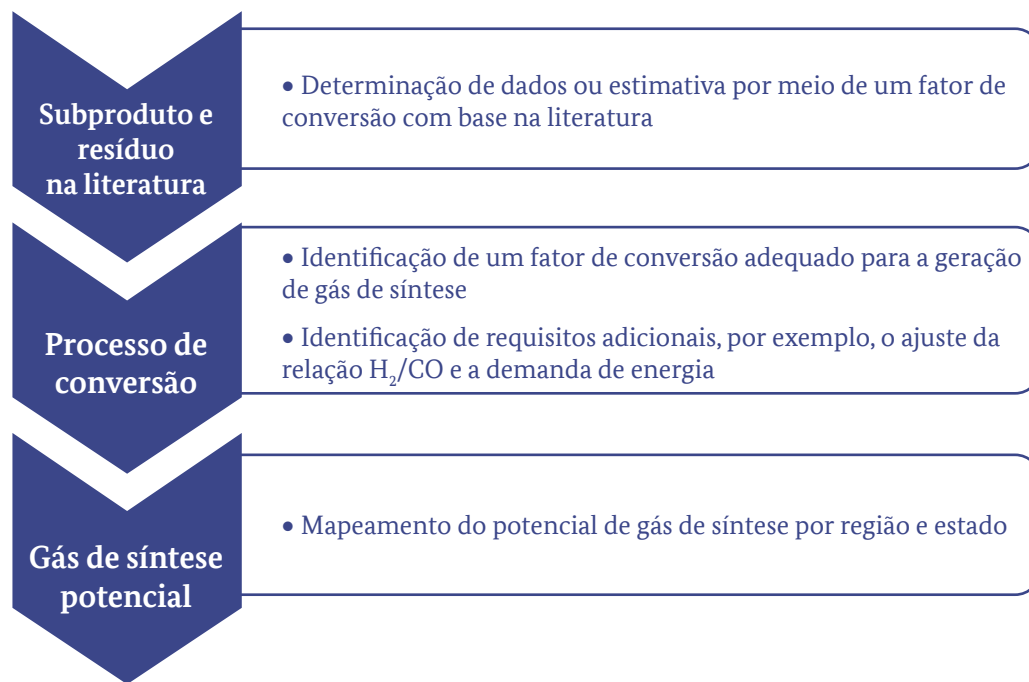


Figura 5: Metodologia para determinação e mapeamento do potencial de produção de gás de síntese. Fonte: elaboração própria

Este estudo está dividido em quatro capítulos. No capítulo 2, a rota da síntese de FT é explicada em mais detalhes conforme o ProQR é apresentado. O gás de síntese é examinado como um intermediário versátil. Seus requisitos para a rota de FT são fornecidos e os processos de geração direta e indireta de gás de síntese são exibidos. Nesse capítulo, os processos de conversão usados para determinar a produção potencial de gás de síntese e suas demandas de energia também são apresentados.

No capítulo 3, são listadas as fontes de matérias-primas diretas e indiretas identificadas no Brasil, e as indústrias são priorizadas e selecionadas por meio de uma matriz de avaliação com foco em um futuro descarbonizado. As indústrias selecionadas são então estudadas em mais detalhes, analisando seus principais processos bem como subprodutos e resíduos adequados para a produção de gás de síntese.

No capítulo 4, a produção potencial de gás de síntese é determinada após estimar os subprodutos e resíduos para cada indústria por região e estado. Feito esse mapeamento, as indústrias são comparadas e possíveis localizações para a produção de combustível de aviação por algumas indústrias são identificadas e apresentadas.

Ao final, é oferecida uma conclusão geral sobre o tema, acompanhada de comentários para estudos futuros.

2. Estado da arte

Neste capítulo, apresentamos combustíveis alternativos para o setor de aviação e explicamos a rota de produção de FT aplicada no âmbito do projeto ProQR. Em seguida, o gás de síntese, um dos mais importantes intermediários dessa rota, é apresentado, assim como seus requisitos. Os processos de geração de gás de síntese são descritos, e os processos de conversão usados neste estudo são explicados.

2.1. Combustíveis alternativos para o setor de aviação

Os combustíveis para aviação devem atender a rígidos padrões internacionais. No Brasil, o órgão responsável pela regulamentação dos combustíveis para aviação é a ANP. A Tabela 1 apresenta as principais rotas para a produção de combustíveis alternativos de aviação já certificados pela American Society for Testing and Materials (ASTM). Também são exibidos os teores máximos aprovados de mistura com combustível convencional (Jet A-1).

Tabela 1: Rotas de produção de combustível de aviação aprovadas pela ASTM. Fonte: adaptado de Carvalho et al. (2019) e Ebner (2018)

Rota	Mistura máxima	Certificação da ASTM	Aprovada pela ASTM desde
Fischer-Tropsch com aromáticos (FT-SPK/A)	50%	D 7566 Anexo IV	2015
Fischer-Tropsch (FT-SPK)	50%	D 7566 Anexo I	2009
Ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (HEFA)	50%	D 7566 Anexo II	2011
Álcool para combustível de aviação (ATJ)	50%	D 7566 Anexo V	2018
Açúcares fermentados e hidroprocessados (SIP)	10%	D 7566 Anexo III	2014

A via tecnológica aplicada no ProQR é baseada na rota de FT, que gera produtos sintéticos livres de enxofre e de alta qualidade, com alto índice de cetano e teor insignificante de nitrogênio, níquel, vanádio, asfaltenos e aromáticos (Resolução 778 da ANP). Embora haja várias plantas alternativas de produção de combustível para aviação em escala comercial, que seguem principalmente a rota HEFA (Carvalho et al., 2019), o Brasil pode ser um dos primeiros países do mundo a produzir combustível PtL para aviação com a rota de FT. Conforme apresentado na Tabela 1, de acordo com os Anexos I e IV da instrução ASTM D7566 e a Resolução 778 da ANP, o combustível sintético produzido pela rota de FT já pode ser misturado, em até 50%, com o Jet-A1 convencional como combustível *drop-in*.

Em DENA (2019b), é mostrado que o combustível de aviação PtL da rota FT exige muito menos água do que outras tecnologias. Ele também é mais favorável do que outras rotas tecnológicas em termos de uso do solo e, portanto, mais sustentável. Uma descrição mais detalhada e uma comparação das rotas de produção e certificação de combustível de aviação podem ser encontradas em Ebner (2018).

A Figura 6 mostra as principais etapas da rota tecnológica utilizada no ProQR. O Nível de Maturidade Tecnológica (TRL, na sigla em inglês) – que usa uma escala de 1 a 9, sendo 9 o mais maduro – da síntese de FT é 8. Esta é muitas vezes considerada uma tecnologia-chave para a produção de combustíveis para transporte e outros produtos líquidos (DENA, 2019b; Ebner, 2018). A rota tecnológica escolhida no projeto ProQR usa principalmente água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) e eletricidade de fontes renováveis de energia para produzir combustível de aviação PtL. Na abordagem descentralizada mostrada na Figura 6, o CO_2 é capturado do ar ambiente por um sistema de Captura Direta do Ar (CDA) e o hidrogênio (H_2) é obtido da eletrólise da água para gerar gás de síntese. O gás de síntese processado, que é o principal intermediário da rota de FT, entra no reator de FT, resultando em *syncrude*. Os hidrocarbonetos resultantes são praticamente isentos de impurezas, como enxofre, níquel, nitrogênio, vanádio e asfaltenos (Carvalho et al., 2019). Então, as cadeias longas e pesadas de hidrocarbonetos são quebradas em outras mais curtas e leves. As substâncias resultantes incluem gases e hidrocarbonetos líquidos, como diesel, gasolina e querosene, que é o foco do ProQR.

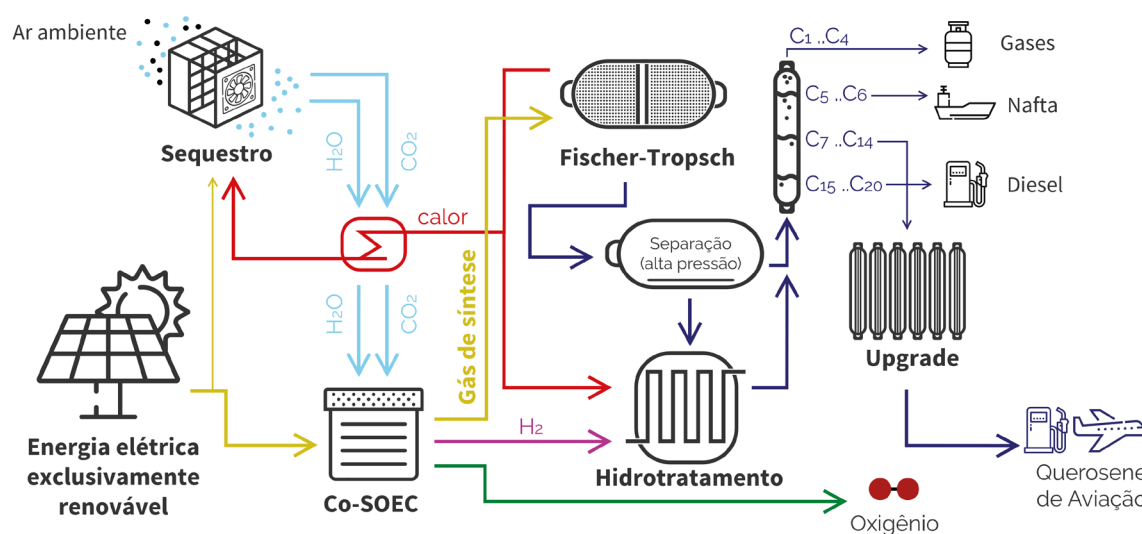


Figura 6: Abordagem descentralizada para a produção de SAF pelo ProQR. Fonte: GIZ (2020)

O gás de síntese é um intermediário versátil no processo e desempenha um papel importante na produção de combustíveis sintéticos, principalmente na rota de FT. Portanto, este estudo foca o potencial de produção desse importante intermediário no Brasil. Além da matéria-prima e da rota de produção já mostradas, existem outras fontes e maneiras de gerar gás de síntese. Na seção a seguir, o gás de síntese e suas rotas de produção passíveis de utilização na síntese de FT são descritos em mais detalhes.

2.2. Produção de gás de síntese

“Gás de síntese” geralmente refere-se a uma mistura gasosa que consiste principalmente de H_2 e CO , bem como de componentes menos desejados, como CO_2 , H_2O e CH_4 (Aberg, 2014). Ele oferece muitos benefícios comerciais (Figura 7) e pode ser usado não apenas na geração de energia, fabricação de ferro e aço e produção de gás natural sintético (GNS), mas também na obtenção de produtos químicos, petroquímicos e combustíveis de grande valor, como fertilizantes/metanol, dimetil éter (DME), etileno, hidrogênio e amônia. Além disso, é usado para criar produtos FT, incluindo combustível sintético de aviação.

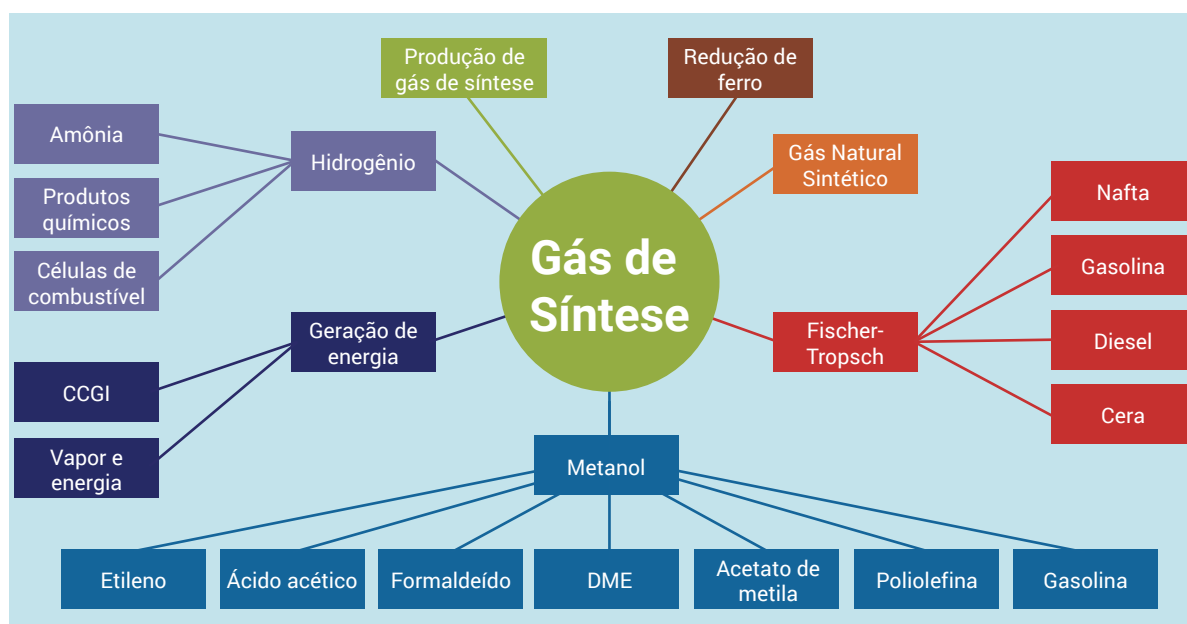


Figura 7: Produtos finais do gás de síntese. Fonte: Aberg (2014)

O gás de síntese pode ser gerado a partir de uma ampla variedade de matérias-primas que contêm carbono. A matéria-prima pode ser de origem fóssil, como gás natural, carvão, linhita, petróleo ou coque de petróleo; biomassa lignocelulósica, como culturas energéticas lenhosas, oleaginosas, resíduos orgânicos, silvicultura e agrorresíduos; outros subprodutos de processos agroindustriais e resíduos (Aberg, 2014; Carvalho et al., 2019). Para combustíveis PtL neutros em carbono, a fonte de matéria-prima desempenha um papel importante, devendo ou já ser neutra em carbono, ou ser um subproduto e/ou resíduo. Este estudo concentra-se em subprodutos industriais de baixo valor e resíduos industriais inevitáveis.

Tabela 2: Lista de produtos finais da síntese química de gás de síntese e seus requisitos para a razão H_2/CO . Fonte: adaptado de Aberg (2014)

Produto	Razão H_2/CO
Metanol	≈ 2
Amônia	∞
DME	1
GNS	1,5–3
Combustíveis FT	2
Hidrogênio	∞
Alcoóis	1–1,5

A composição exata do gás de síntese é difícil de prever e depende de vários fatores, como a matéria-prima primária e o processo de conversão usado para sua produção (Chen et al., 2018). Os produtos derivados do gás de síntese têm requisitos diferentes quanto à composição desse gás, em particular a razão H_2/CO e a tolerância a impurezas (Aberg, 2014). Na Tabela 2, é mostrada uma lista de produtos finais comuns da síntese química de gás de síntese e sua razão exigida de H_2/CO . A proporção ótima de H_2/CO da composição do gás de síntese para a síntese de FT neste projeto é 2/1.

O gás de síntese limpo é a base para a produção de vários combustíveis e produtos químicos. O processo de FT é uma reação promovida por catalisador e tem requisitos específicos de pureza e qualidade do gás de síntese produzido (ver Tabela 3). É necessário remover o enxofre e o cloro do gás de síntese para evitar o envenenamento do catalisador. Além disso, etapas de purificação costumam ser necessárias para evitar a desativação do catalisador causada por partículas, metais alcalinos, CO_2 e alguns gases inertes do catalisador (Aberg, 2014). O gás de síntese gerado deve ser limpo e acondicionado, se necessário, para remover impurezas e ajustar a relação H_2/CO para 2/1.

Tabela 3: Requisitos do gás de síntese para o processo de FT. Fonte: adaptado de Allegue e Hinge (2012)

Impureza	Nível de tolerância
$H_2S + COS + CS_2$	1 ppmv 0,2 ppm 60 ppb
$NH_3 + HCN$	1 ppm
$HCL + HBr + HF$	10 ppb
Metais alcalinos (Na e K)	10 ppb
Sólidos (fuligem, poeira, cinzas)	Essencialmente livre
Compostos orgânicos	Abaixo do ponto de orvalho
Heteroaromáticos	1 ppm
Nitrogênio e nível de enxofre	minimizado

ppm = partes por milhão; ppmv = partes por milhão em volume; ppb = partes por bilhão

Existem vários processos para a geração de gás de síntese a partir de uma série de matérias-primas. Neste estudo, são examinadas diferentes rotas de produção de gás de síntese adequadas para a síntese de FT abordadas na literatura. Essas rotas serão usadas para calcular a produção potencial de gás de síntese no Capítulo 4. O foco é a geração de H_2 e CO, que pode ocorrer separadamente (produção indireta de gás de síntese) ou de forma combinada em um processo (produção direta). A seção a seguir explica esses dois métodos.

2.2.1. Produção indireta de gás de síntese

Na produção indireta de gás de síntese, H_2 e CO são gerados separadamente e combinados em um processo de conversão final. A seguir, apresentamos os processos de geração de H_2 por meio da eletrólise da água e do CO a partir de fontes de CO_2 . Depois, detalhamos o processo de conversão para a produção de gás de síntese adotado neste estudo.

2.2.1.1. Produção de dióxido de carbono

O CO, um dos principais compostos do gás de síntese, é convertido em hidrocarbonetos pela síntese de FT (Gonçalves et al., 2017). Ele pode ser produzido pela conversão de CO_2 , que é obtido de duas formas principais (DENA, 2019b): CDA e captura de carbono de fontes concentradas. A pureza do CO_2 obtido é um requisito importante para o processo de conversão posterior.

A reação $CO_2 + H_2 \rightleftharpoons CO + H_2O$, chamada de reação de mudança do vapor de água (RWGS, na sigla em inglês), é uma das principais formas de fazer essa conversão. A conversão eficiente de CO_2 em CO depende do uso de catalisadores que tornam o processo mais seletivo, i.e., evitam uma geração significativa de outros produtos além do CO. Um desses produtos indesejados é o metano (CH_4), produzido na reação de metanação, que pode ocorrer concomitantemente à reação RWGS.

Ressalta-se novamente que, para contribuir com a redução das emissões de GEE e criar produtos neutros em carbono, não se deve formar CO_2 na geração de produtos sintéticos, como o combustível de aviação.

As duas principais formas de obter CO_2 para a produção de gás de síntese são descritas a seguir.

2.2.1.1.1. Captura direta do ar

O CO_2 pode ser capturado e filtrado diretamente do ar ambiente. Embora o ar ambiente consista principalmente de nitrogênio e oxigênio, sua concentração de CO_2 atingiu 414 ppm e está aumentando. A remoção direta de CO_2 ajuda a atingir as emissões zero e negativa desejadas globalmente. A captura de CO_2 do ambiente é uma tecnologia relativamente nova, com TRL de 6 (DENA, 2019b). A Swiss Climeworks (n.d.), empresa que desenvolveu a primeira tecnologia comercial de remoção de carbono, está trabalhando em estreita colaboração com o ProQR, especialmente em relação à abordagem descentralizada (ver Figura 6 no Capítulo 1).

Durante o processo de captura (Figura 8), o ar é puxado para dentro da planta e o CO_2 do ar é ligado quimicamente ao filtro. Uma vez saturado com CO_2 , após aproximadamente três horas, o filtro é aquecido (usando principalmente calor de baixo grau como fonte de energia) a cerca de 100°C para liberar o CO_2 . O CO_2 liberado é concentrado e atende aos requisitos para a eletrólise, com uma pureza de cerca de 99,9% (Climeworks, n.d.). De acordo com a Climeworks, a demanda de energia da planta varia entre 1.500 e 2.000 kWh_{th} e 200 a 300 kWh_{el} , e 5 toneladas de CO_2 podem ser obtidas por dia com a planta DAC-36.

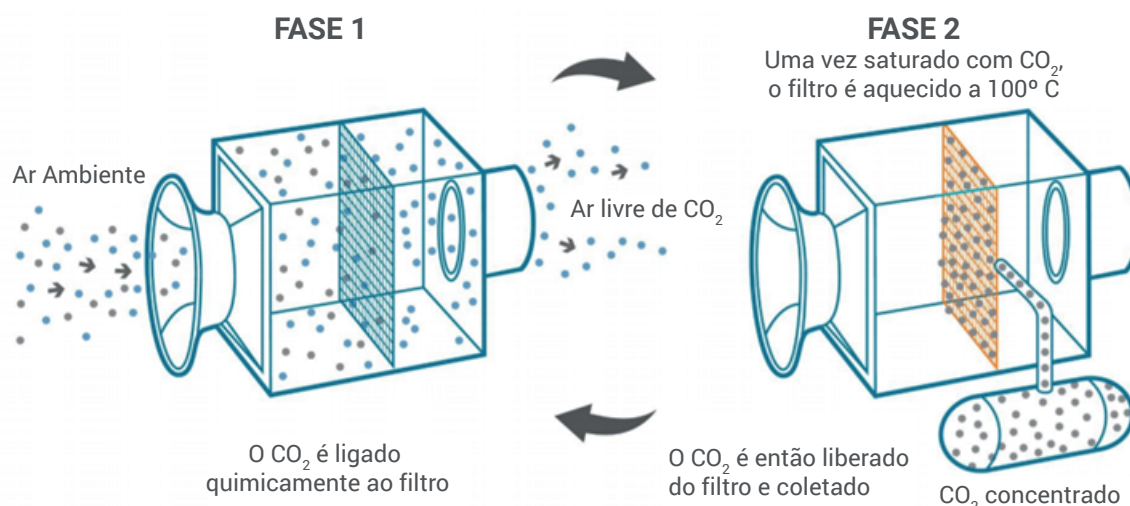


Figura 8: Sistema simplificado de captura direta do ar da Climeworks (n.d.)

2.2.1.1.2. Captura de carbono de fontes concentradas

O CO_2 também pode ser capturado de fluxos de emissão estacionária. O setor industrial representa uma possível fonte de carbono para a produção de gás de síntese. A utilização do CO_2 gerado inevitavelmente pelo setor industrial não só contribui para a redução das emissões de GEE, mas também abre oportunidades para o desenvolvimento de produtos de alto valor agregado, como o combustível sintético de aviação por meio do gás de síntese, sob os conceitos de simbiose industrial e biorrefinaria. O CO_2 capturado de fontes estacionárias deve ser purificado para atender aos requisitos de conversão.

Existem quatro processos principais para capturar CO_2 de fontes concentradas: pós-combustão, pré-combustão, oxidação e separação de processos industriais (IOGP, 2019). Eles são descritos a seguir e ilustrados na Figura 9.

Na *captura pós-combustão*, o CO_2 é separado do gás de combustão em instalações industriais ou plantas de energia após a queima de combustíveis fósseis ou biomassa na presença de ar. A captura de CO_2 por sistemas de absorção à base de aminas, como a tecnologia da monoetanolamina (MEA), é reconhecida como tecnologia de referência e está disponível comercialmente (IEAGHG, 2017; IOGP, 2019). Depois de absorvidas pelas aminas, as moléculas de CO_2 são liberadas por aquecimento ou redução drástica de pressão para resultar em CO_2 de alta pureza. A pós-combustão está entre as tecnologias mais usadas e maduras para captura de CO_2 de fontes estacionárias, sendo utilizada com sucesso em escala industrial (Ketzer et al., 2014).

Na *captura pré-combustão*, o CO_2 é separado antes da queima de combustíveis fósseis ou biomassa. Trata-se de um processo com três etapas. Primeiro, o combustível é gaseificado, o que já resulta em gás de síntese. Isso é seguido por uma conversão *shift* de CO em CO_2 para produzir mais hidrogênio. Por fim, o CO_2 é separado para posterior tratamento e o hidrogênio atua como vetor de energia (IEAGHG, 2017). Em comparação com a pós-combustão, a captura pré-combustão não é facilmente aprimorável nas fontes estacionárias existentes. Ela tem sido usada principalmente no Ciclo Combinado com Gaseificação Integrada (CCGI) como tecnologia de carvão limpo.

Na *oxicombustão*, é usado oxigênio puro, em vez de ar, para a queima do combustível. O gás de combustão resultante é rico em CO_2 , mas contém outros compostos que requerem que o fluxo de CO_2 seja purificado antes de sua utilização (IEAGHG, 2017). Em comparação com a tecnologia de pós-combustão, a tecnologia de oxicombustão ainda está em um estágio pré-comercial.

Vários tipos de *processos industriais* geram CO_2 que pode ser separado usando as tecnologias de captura descritas acima ou métodos menos complexos, no caso de fontes biogênicas. Para fontes biogênicas de CO_2 , também conhecidas como fontes de CO_2 de alta pureza, tende a haver menor necessidade de purificação em comparação com outras fontes industriais. Nesse caso, o CO_2 passa apenas por etapas de compressão (IEAGHG, 2017; Restrepo-Valencia & Walter, 2019).

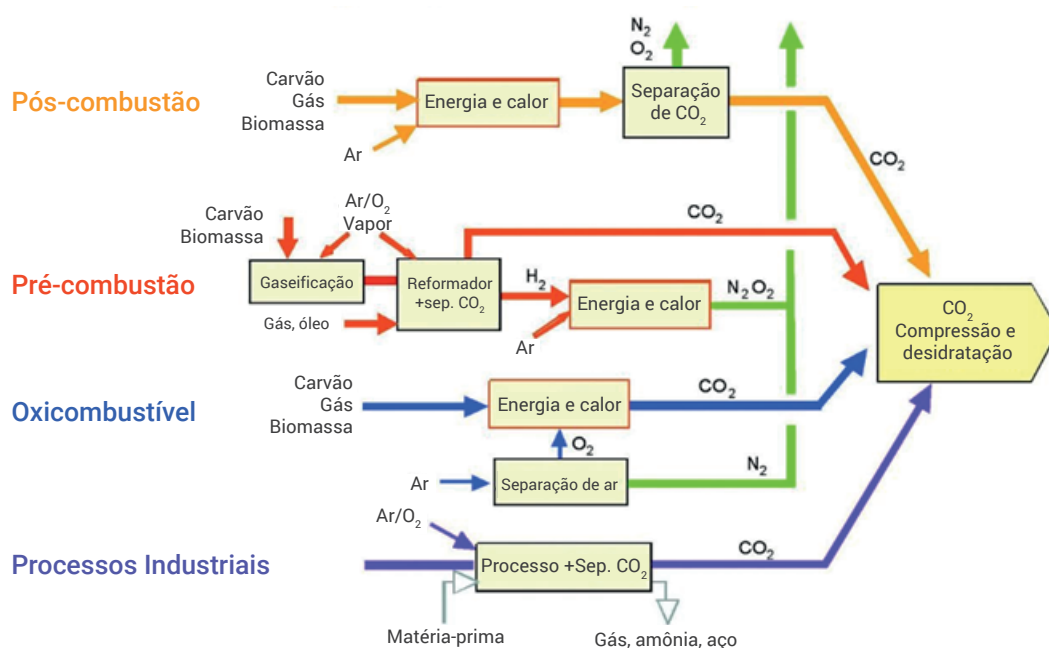


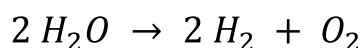
Figura 9: Principais sistemas de captura de CO_2 . Fonte: IPCC (2015) and Ketzer et al. (2014)

Neste estudo, a pós-combustão à base de amina é a tecnologia aplicada para a captura de CO₂ de fontes industriais. Em comparação com outros sistemas, a captura pós-combustão é uma tecnologia comprovada e madura, que está disponível comercialmente e pode ser facilmente qualificada para ser usada em plantas existentes (Kuparinen et al., 2019). De acordo com a literatura, um processo de captura convencional MEA pode ser considerado o método de referência. Ele tem uma taxa de captura de 80% a 90%, com pureza de CO₂ de cerca de 99%. A demanda de energia para a regeneração do sorvente está entre 3 e 4 megajoules (MJ) por kg de CO₂ (DVWG, 2018; Kuparinen et al., 2019). Para os cálculos, este estudo considera uma demanda de energia de 3,7 MJ por kg de CO₂ e uma taxa de captura de 90%.

2.2.1.2. Produção de hidrogênio

O hidrogênio é um dos melhores vetores de energia e tem um enorme potencial para a concepção e produção de combustíveis futuros. No entanto, diversas dificuldades devem ser enfrentadas no estabelecimento de seus processos de produção, a maioria relacionada a infraestrutura – incluindo armazenamento e transporte –, o que retarda seu uso comercial. Portanto, os combustíveis sintéticos gerados pela rota de FT representam uma boa alternativa não só pela possibilidade de se beneficiar da infraestrutura existente no processo produtivo, mas também pela oportunidade de melhorar e ampliar sua capacidade de armazenamento (Wang et al., 2016). O hidrogênio é uma das principais matérias-primas na síntese de FT, junto do CO. Ele pode ser obtido de uma ampla gama de fontes, como gás natural, biomassa e até mesmo água. Além disso, pode ser um subproduto da produção industrial de cloro, cianeto e estireno, por exemplo (IEAGHG, 2017). Devido ao seu alto valor inerente, todavia, ele não será considerado como possível fonte de matéria-prima neste estudo.

Para produzir um combustível sem impactos climáticos, o hidrogênio usado deve resultar da eletrólise da água alimentada por fontes de energia renováveis. Atualmente, eletrólise alcalina, eletrólise por membrana de troca de prótons (PEM) e célula eletrolítica de óxido sólido (SOEC) são as três principais tecnologias para a produção de hidrogênio (DENA, 2019b). Durante a eletrólise, a água se divide em hidrogênio e oxigênio por energia elétrica, conforme mostrado na equação a seguir.



A eletrólise alcalina e a eletrólise PEM são processos de conversão de baixa temperatura e representam a mais comum tecnologia industrial aplicada, uma vez que ambas já são usadas em escala comercial (DVWG, 2018). Uma tecnologia desenvolvida mais recentemente é a SOEC, um processo de conversão de alta temperatura que promete maior eficiência e menor consumo de energia (DENA, 2019b). Essa tecnologia foi demonstrada apenas em escala de planta-piloto por empresas como a Sunfire GmbH, na Alemanha, que está trabalhando em estreita colaboração com o projeto ProQR. A SOEC é atualmente uma tecnologia ainda menos madura e exige maiores custos de investimento se comparada à eletrólise alcalina e à eletrólise PEM. No entanto, estima-se que o custo de investimento da eletrólise da água seja reduzido nas próximas décadas, especialmente com o uso da tecnologia SOEC. Isso pode acontecer devido à economia de escala, que acompanha a ampliação de escala do tamanho da planta e a taxa de utilização das plantas de conversão (DENA, 2019b). Na Tabela 4, são apresentados o TRL, a eficiência e o consumo de energia dessas três tecnologias. O método de eletrólise usado neste estudo é baseado na SOEC e detalhado a seguir.

Tabela 4: Consumo de energia, eficiência e TRL de tecnologias de eletrólise da água. Fonte: adaptado de DENA (2019b) e DVWG (2018)

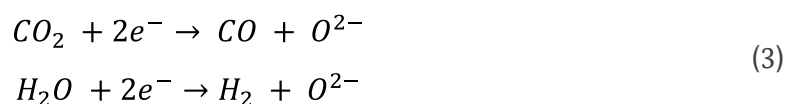
	Eletrólise alcalina/PEM	SOEC
TRL	9/8	6
Eficiência (%)	41–69	65–95
Consumo de energia (MJ/m ³)	16,6	15,7

2.2.1.3. Produção de gás de síntese por eletrólise co-SOEC

O H₂O e o CO₂ capturado devem ser convertidos para formar gás de síntese, que pode ser gerado por uma conversão separada de CO₂ e H₂O e posterior mistura, junta ou simultaneamente. Na rota de conversão separada, o H₂O é convertido em hidrogênio pela eletrólise da água e o CO₂ é convertido em CO por meio da reação RWGS, conforme mostrado a seguir. Essa reação usa o hidrogênio da eletrólise da água para converter o CO₂ em vapor e CO (DVWG, 2018). Após a conversão separada, CO e H₂ são misturados para formar o gás de síntese.



CO₂ e H₂O são convertidos simultaneamente em gás de síntese por uma coeletrólise de óxido sólido (co-SOEC). Além do hidrogênio produzido pela SOEC, esse processo de eletrólise converte CO₂ em CO ao mesmo tempo. O princípio por trás da eletrólise co-SOEC para a produção de gás de síntese é ilustrado na Figura 10. CO₂ e H₂ entram na célula e recebem elétrons no cátodo, que são fornecidos por uma fonte externa de energia renovável. Esse procedimento produz gás de síntese, bem como ânions de oxigênio, que são transportados através do eletrólito para o ânodo, resultando em oxigênio como subproduto (Wang et al., 2016).



Além da reação eletroquímica no cátodo, ocorre a reação química RWGS, que reduz o consumo elétrico total (Wang et al., 2016).

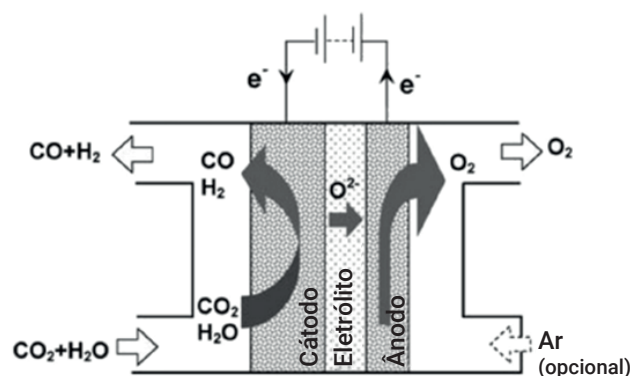


Figura 10: Princípio de funcionamento da eletrólise co-SOEC. Fonte: Wang et al. (2016)

De acordo com Wang et al. (2016), a eletrólise co-SOEC de alta temperatura é uma tecnologia altamente eficiente para a produção de gás de síntese, com baixo custo e maior durabilidade. Para atingir esses resultados, ela requer a purificação prévia do CO_2 . Uma vez que se usa o CO_2 de alta pureza, nenhuma etapa extra de limpeza de gás é necessária após a conversão. Neste estudo, devido às vantagens da eletrólise co-SOEC, essa tecnologia é considerada como o processo de conversão para a produção de gás de síntese. Ela é apresentada em Löchle (2019) e Fu et al. (2010) e resulta em 0,84 kg de gás de síntese por kg de CO_2 . O gás de síntese resultante atende os requisitos para a síntese de FT, como pureza ou razão H_2/CO de 2/1, e geralmente não exige ajustes adicionais. Supõe-se que o H_2O necessário na eletrólise para a produção de H_2 já esteja disponível.

Como mencionado anteriormente, a eletrólise co-SOEC atualmente acarreta altos custos de investimento e significativa demanda de energia, mas esses custos devem diminuir nas próximas décadas. Essa tecnologia mostra uma demanda de energia de 1,9 kWh_{th} e 5,1 kWh_{el} para cada kg de gás de síntese produzido (DVWG, 2018).

2.2.2. Produção direta de gás de síntese

A produção direta de gás de síntese significa a geração simultânea de H_2 e CO por meio de um processo de conversão de fontes de matéria-prima. Os processos de reforma, pirólise, gaseificação e cogaseificação são exemplos de tecnologias de conversão. De acordo com uma pesquisa na literatura sobre a produção direta de gás de síntese para a síntese de FT, a gaseificação da biomassa e a reforma do gás natural ou biogás estão entre as mais estudadas até o momento (Amin et al., 2015; Carvalho et al., 2019; DVWG, 2018; Garcia et al., 2019; Isaksson, 2015; Resolução 778 da ANP). Os processos de gaseificação e reforma são detalhados nas seções a seguir. Além disso, processos de conversão promissores, segundo a literatura, são aplicados nos cálculos relacionados ao potencial de gás de síntese a ser tratado no Capítulo 4.

2.2.2.1. Gaseificação de biomassa

A gaseificação é um processo de conversão termoquímica pelo qual a oxidação parcial de matérias-primas sólidas ou líquidas que contêm carbono, pela introdução de oxigênio ou vapor, resulta em gás de síntese rico em H_2 e CO (Garcia et al., 2019). Devido à sua oxidação parcial, a maior parte do conteúdo de energia da matéria-prima permanece no gás de síntese. Como tecnologia, a gaseificação é conhecida há vários séculos e tem sido usada para a produção de combustível por meio da síntese de FT, principalmente usando carvão como matéria-prima. Hoje a tecnologia de gaseificação tem um TRL de 9 e é um processo promissor na produção de combustível sintético também no que diz respeito à conversão de biomassa e resíduos (Carvalho et al., 2019; Garcia et al., 2019). Como este projeto visa gerar combustível PtL de forma sustentável, apenas biomassa de resíduos industriais e subprodutos de baixo valor são considerados para a produção de gás de síntese por meio da gaseificação neste estudo.

A gaseificação é apenas uma das várias etapas para produzir gás de síntese para síntese. O pré-tratamento da matéria-prima (secagem, moagem etc.) e a remoção de impurezas do gás de síntese também são geralmente necessários. Na Figura 11, é mostrado um esquema da tecnologia de gaseificação com um fluxo de resíduo de biomassa como matéria-prima. As etapas de pré-tratamento da biomassa, como secagem e torrefação, são consideradas de grande impor-

tância para maximizar a eficiência de conversão e as características do combustível (Garcia et al., 2019). O gás de síntese derivado da gaseificação de biomassa é frequentemente poluído por alcatrão, cinzas e outras emissões particuladas, como nitrogênio e enxofre (DVWG, 2018), que devem ser filtrados para atender aos requisitos para a síntese de FT. Além dessa etapa de limpeza, o gás de síntese passa por uma etapa de condicionamento para remoção de CO_2 e outras impurezas, sendo ajustada a relação H_2/CO (Carvalho et al., 2019). Existem diferentes soluções e tecnologias de adsorção para a remoção de CO_2 por membrana do gás de síntese, como a adsorção de amina MEA. Um resumo das tecnologias de remoção de CO_2 pode ser encontrado em Allegue e Hinge (2012).

O desenvolvimento da cadeia de suprimentos, o pré-tratamento de resíduos e o tratamento de gás de síntese são desafios e consomem muita energia. Por isso, geralmente são apontados como as principais barreiras a ser superadas (Garcia et al., 2019).

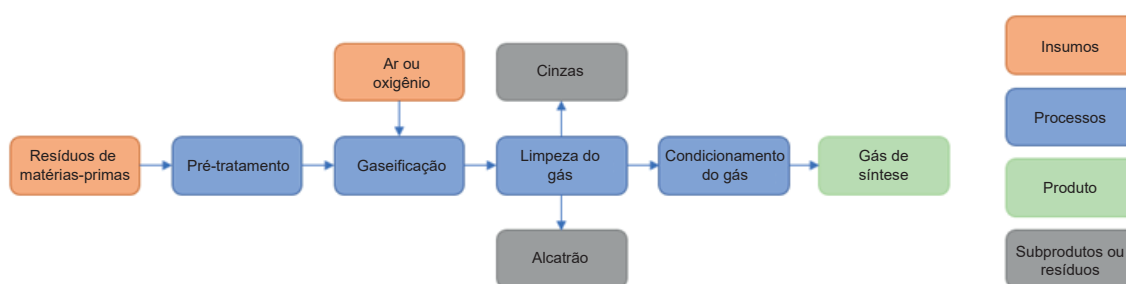


Figura 11: Etapas da gaseificação da biomassa. Fonte: adaptado de Garcia et al. (2019) and Carvalho et al. (2019)

Há uma variedade de tecnologias de gaseificação disponíveis e em uso, como leito fixo, leito fluidizado, fluxo arrastado e gaseificador de plasma. Segundo a literatura, o leito fluidizado e os gaseificadores de fluxo arrastado são as tecnologias mais adequadas para a produção de combustível sintético (Carvalho et al., 2019; DVWG, 2018; Resolução 778 da ANP). A seguir, essas tecnologias são brevemente descritas, e apresenta-se a abordagem adotada neste estudo para a gaseificação adequada de diferentes matérias-primas.

Gaseificação em leito fluidizado: o processo de fluidização ocorre quando um fluido passa para cima através de um leito de partículas sólidas e, devido à velocidade desse fluido, as partículas ficam suspensas e se comportam como um fluido denso (McCabe et al., 1993). O gaseificador de leito fluidizado é uma tecnologia madura no que diz respeito à gaseificação do carvão e já disponível comercialmente no caso da biomassa (Garcia et al., 2019). Os gaseificadores de leito fluidizado são um processo de alta eficiência para a gaseificação de biomassa (Aberg, 2014; DVWG, 2018). Devido à boa mistura da matéria-prima e do oxidante na parte inferior do leito, essa gaseificação cria uma distribuição uniforme de temperatura e tem excelente transferência de calor e massa (Aberg, 2014). O processo de gaseificação geralmente opera sob tempera-

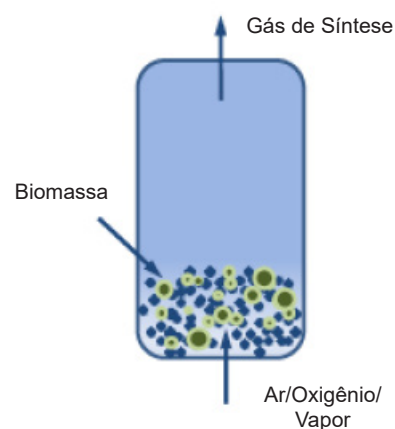


Figura 12: Gaseificador simplificado de leito fluidizado. Fonte: Chhiti & Kemiha (2013).

turas entre 800°C e 1000°C e uma faixa de pressão entre 0 bar e 70 bares. Os reatores de leito fluidizado mais comuns são o borbulhante e o circulante (Chhiti & Kemiha, 2013). As baixas temperaturas durante a gaseificação em comparação com a gaseificação de fluxo arrastado resultam em concentrações de alcatrão bastante altas, o que torna inevitável a etapa de limpeza (DVWG, 2018). Na Figura 12, é esquematizado um gaseificador de leito fluidizado. Nesse tipo de reator, o fluido usado é ar, vapor ou oxigênio. Insere-se biomassa reduzida ao tamanho de partícula e usa-se um material de leito inerte ou catalítico para transportar calor e massa através do reator (Chhiti & Kemiha, 2013).

Gaseificação de fluxo arrastado: neste processo, a biomassa entra em forma de pó concorrentemente com o ar e eles reagem em uma nuvem densa de partículas em alta temperatura (Chhiti & Kemiha, 2013). O gaseificador de fluxo arrastado está operando comercialmente como uma tecnologia de gaseificação de carvão em grande escala (Aberg, 2014); no entanto, há pouca experiência em tais sistemas no caso da biomassa (Chhiti & Kemiha, 2013). A gaseificação de fluxo arrastado com biomassa residual existe apenas em instalações de teste, como a planta-piloto de grande escala do projeto bioliq no Instituto de Tecnologia de Karlsruhe (KIT, na sigla em inglês), na Alemanha (DVWG, 2018; KIT, 2020). Por razões econômicas, é necessário construir gaseificadores de fluxo arrastado apenas em grande escala, o que torna interessante a produção de combustíveis sintéticos em grandes quantidades. A Figura 13 mostra um esquema do gaseificador de fluxo arrastado. Em comparação com o gaseificador de leito fluidizado, o gaseificador de fluxo arrastado opera em condições mais severas, como temperaturas muito altas, entre 1200°C e 1500°C, e pressões de 20 bares a 80 bares, o que resulta em gás de síntese quase livre de alcatrão e derretimento de cinzas (Chhiti & Kemiha, 2013; DVWG, 2018). Esses subprodutos são coletados no fundo do reator na forma de escória. Embora não exija o mesmo processo de limpeza que um gaseificador de leito fluidizado, um gaseificador de fluxo arrastado requer pré-tratamento por pirólise ou torrefação (Allegue & Hinge, 2012).

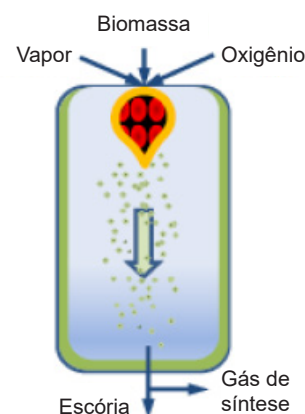


Figura 13: Gaseificador simplificado de fluxo arrastado. Fonte: Chhiti & Kemiha (2013).

A composição exata do gás de síntese é difícil de prever e pode variar dependendo das matérias-primas de biomassa e da tecnologia de gaseificação usada (Chiche et al., 2013). O gás de síntese resultante depende fundamentalmente das condições de gaseificação, como temperatura e pressão de operação, taxa de aquecimento, tipo de gaseificador, escolha do agente gaseificador e composição da matéria-prima (Resolução 778 da ANP). Vários estudos investigaram a gaseificação de resíduos de biomassa, mas a maioria deles foi feita em condições de laboratório.

Os dois processos de gaseificação apresentados em DVWG (2018) são usados como referência para propiciar uma comparação representativa entre as matérias-primas analisadas. Na Tabela 5, são dados os parâmetros dos gaseificadores de leito fluidizado e de fluxo arrastado.

Tabela 5: Parâmetros dos gaseificadores de leito fluidizado e de fluxo arrastado. Fonte: adaptado de DVWG (2018)

Parâmetro	Gaseificador de leito fluidizado	Gaseificador de fluxo arrastado (bioliq)
Temperatura de operação (°C)	800–1000	1200–1500
Eficiência (%)	57–96	60,2
Demanda de energia (kJ/kJ)	0,04	0,29
Composição do gás de síntese (%)		
H ₂	39	36
CO	29	53
CO ₂	17	36
CH ₄	11	0
Razão H ₂ /CO	1,34	0,67

O valor médio de 76,5% é considerado como a eficiência do gaseificador de leito fluidizado, enquanto o gaseificador de fluxo arrastado da bioliq tem eficiência de 60,2%. As eficiências dadas para os processos estão relacionadas ao valor calorífico. Esse valor em si representa o calor liberado quando o composto químico é queimado estequiometricamente. Com a eficiência do processo de gaseificação e os menores valores de aquecimento (LHV, na sigla em inglês) da biomassa e do gás de síntese resultante, a quantidade de gás de síntese gerada por resíduo é estimada da seguinte forma:

$$\eta_{Gasifier} = \frac{LHV_{Syngas} * X_{kgSyngas}}{LHV_{Biomass} * X_{kgBiomass}} \quad (4)$$

Os LHVs para a biomassa considerada são retirados da literatura. Para o LHV de gás de síntese, que não está disponível para cada biomassa, consideramos o valor médio resultante da gaseificação de resíduos de biomassa em outros estudos (Briesemeister, 2014; Costa et al., 2014; Kosov et al., 2015; Larson, 2004). Portanto, este estudo assume um LHV de 9,1 MJ/kg para o gás de síntese.

A demanda de energia mostrada na Tabela 5 está relacionada ao gás de síntese de saída, que resulta em aproximadamente 0,12 kWh e 0,74 kWh por kg de gás de síntese produzido através dos gaseificadores de leito fluidizado e de fluxo arrastado. Pressupõe-se um processo de secagem para o pré-tratamento em que, para cada kg de umidade, um mínimo de 2.260kJ é necessário para vaporizar a água (Adhikari, 2013). Com um teor geralmente presumido de 50% de umidade na biomassa, isso resulta em uma demanda de energia de 0,31 kWh. Para o condicionamento e ajuste da relação H₂/CO, ambos os processos de gaseificação precisam de mais H₂ para atender aos requisitos. Isso pode ser feito por uma reação de deslocamento água-gás ou eletrólise de água, como PEM (ver Tabela 4).

Além das vantagens quanto à baixa produção de poluentes e às altas concentrações de CO em sua composição, o gaseificador de fluxo arrastado é mais adequado para a produção em larga escala de combustível sintético (DVWG, 2018), o que também é de interesse. De qualquer forma, devido a isso, o gaseificador de leito fluidizado é uma tecnologia madura e já disponível comercialmente considerada para os cálculos apresentados no Capítulo 4.

2.2.2.2. Reforma de metano

Outro método de produção de gás de síntese, além da gaseificação da biomassa, é a reforma de metano, que tem sido considerada um dos processos industrialmente importantes há décadas (Amin et al., 2015). A produção de gás de síntese a partir de gás natural detém a maior participação de mercado do volume total de gás de síntese produzido globalmente (Aberg, 2014).

Três grandes processos de reforma dominam a produção comercial de gás de síntese: a reforma catalítica a vapor, que é atualmente o processo mais usado, seguida pela oxidação parcial e pela tecnologia mais recente de reforma de CO_2 . Na Tabela 6, são mostradas suas reações de gás de síntese e entalpias correspondentes (Aberg, 2014).

Tabela 6: Principais processos de reforma de metano com suas reações de gás de síntese e entalpias. Fonte: adaptado de Aberg (2014)

Processo de reforma	Entalpia (kJ/mol)
Reforma a vapor $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	205,9
Oxidação parcial $\text{CH}_4 + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	-35,9
Reforma de CO_2 $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$	247,1

A reforma a vapor com catalisador é realizada na fase gasosa e tem uma alta taxa de conversão (95%), mas a reação é muito endotérmica e opera em alta temperatura e pressão, o que significa que faz uso intensivo de energia e material (Aberg, 2014). Existem possibilidades de cobrir esse calor com auxílio da síntese de FT, que é uma reação exotérmica. A razão H_2/CO resultante é frequentemente muito alta para a síntese de FT e deve ser ajustada (Aberg, 2014). O processo de oxidação parcial ocorre na presença de oxigênio e requer uma alta temperatura de processo. Essa reforma pode operar com ou sem um catalisador e produzir gás de síntese com uma razão preferencial de H_2/CO de cerca de 2.

A reforma a seco ou reforma de CO_2 é outro processo, que oferece benefícios ambientais devido ao uso de CO_2 . Para isso, o CO_2 deve ser separado e purificado por uma tecnologia de captura de carbono. Os catalisadores usados são muito afetados pelo depósito de carbono, o que leva à desativação e a uma vida útil curta. A razão H_2/CO resultante é de cerca de 1 e precisa de ajustes adicionais para a síntese de FT.

Abordagens mais novas superaram as desvantagens dos processos de reforma mencionados acima. O processo de tri-reforma do metano é uma combinação de vapor, oxidação seca e parcial de metano que usa o gás de combustão diretamente. Nesse processo, a razão H_2/CO desejada pode ser alcançada com menor demanda de energia (Amin et al., 2015).

A reforma de metano é uma tecnologia madura em termos de produção direta de gás de síntese e resulta em uma conversão limpa e altamente eficiente, mas tem maior consumo de energia em comparação com o processo de gaseificação (Rostrup-Nielsen, 2000). Por isso, o metano é um produto de alto valor. Uma vez que este projeto visa gerar combustível PtL de forma sustentável em primeiro lugar, apenas o biogás como subproduto de processos industriais será considerado para a produção de gás de síntese. Além do metano, outras matérias-primas podem ser usadas para produzir gás de síntese, como o subproduto industrial glicerol. Na seção a seguir, descreve-se a conversão do glicerol por meio de reforma e gaseificação.

2.2.2.3. Gaseificação e reforma do glicerol

A conversão de glicerol em gás de síntese usando diferentes processos de gaseificação e reforma já foi amplamente relatada em pesquisas. O glicerol ($C_3H_8O_3$) é um subproduto de baixo valor da geração de biodiesel e será descrito com mais detalhes no Capítulo 3. A composição do glicerol obtido muda de acordo com diferentes condições, e o teor de glicerol varia para as diferentes plantas de biodiesel.

O glicerol pode ser convertido diretamente em gás de síntese ou usado como aditivo para a produção de gás de síntese. Os métodos de conversão de glicerol aplicados para a produção de gás de síntese são reforma a vapor, reforma em fase aquosa, oxidação parcial, gaseificação e gaseificação com água supercrítica; além disso, métodos desenvolvidos e adotados mais recentemente incluem reforma a seco, pirólise, plasma por arco térmico ou gaseificação por plasma de micro-ondas e cogaseificação (He, 2017; Nda-Umar et al., 2019; Plácido & Capareda, 2016; Tomosiunas et al., 2019). Na Tabela 7, são apresentados estudos recentes, especificando o processo termoquímico utilizado, o teor de glicerol, as condições experimentais e a razão H_2/CO do gás de síntese produzido.

Tabela 7: Processos de conversão do glicerol

Processo	Teor de glicerol	Condições	Razão H_2/CO	Fonte
Reação catalítica	30%	850°C–1000°C	1,3–1,83	Soares et al. (2006)
Gaseificação com ar/ O_2	60%	950°C–1500°C Razão de ar = 0,4	1,02	Yoon et al. (2010)
Cogaseificação com caroço de azeitona	49%	750°C Razão de ar = 0,2	1,42	Skoulou e Zabaniotou (2013)
Cogaseificação com cavaco de madeira	20%	850°C Razão de ar = 0,293	0,98	Wei et al. (2011)
Cogaseificação com resíduo de pinhão-manso ou resíduo de casca de palmeira	30%	700°C–900°C Razão de ar = 0–0,6	0,59 (resíduo de pinhão-manso) 0,39 (resíduo de casca de palmeira)	Sricharoenchaikul & Atong (2012)
Gaseificação de plasma por micro-ondas	100%	Razão de ar = 0–0,4 Gerador de micro-ondas de 2 kW	1,63	Yoon et al. (2013)
Gaseificação de plasma por arco térmico	85%	Vapor de água 83% Ar 17%	2,07	Tomosiunas et al. (2019)

Como pode ser visto, a razão H_2/CO varia em diferentes condições, como o método de conversão usado, o teor de glicerol e a temperatura. Portanto, os requisitos para a síntese de FT normalmente não são fornecidos, e o gás de síntese requer um aprimoramento adicional do produto antes de ser usado como matéria-prima. Uma série de reações paralelas também pode afetar os métodos para converter glicerol em gás de síntese (Tomosiunas et al., 2019).

Devido à conversão mais limpa proporcionada pelo processo de reforma em comparação com a gaseificação, foi adotado neste estudo um processo de reforma a vapor do glicerol. O reformador catalítico a vapor para a conversão de glicerol é retirado de Soares et al. (2006) e analisado em Löchle (2019) quanto ao seu potencial de produção de gás de síntese adequado para o projeto ProQR. O processo de reforma é uma reação endotérmica, conforme mostrado abaixo:



Em condições experimentais, a reforma do glicerol com um teor de glicerol de 30% ocorre sob temperaturas de 300°C a 445°C. Esse processo de reforma resulta em 0,43 kg de gás de síntese por kg de glicerol e tem uma razão H_2/CO entre 1,31 e 1,83, que é alterada para 2/1 por uma eletrólise PEM. A demanda de energia para a conversão do glicerol é de cerca de 2,43 kWh por kg de gás de síntese produzido, em que a proporção é ajustada por meio de uma eletrólise PEM, que tem demanda energética de 0,54 kWh por kg de gás de síntese produzido (Löchle, 2019).

3. Potenciais matérias-primas para a produção de gás de síntese no Brasil

Neste capítulo, os setores e as indústrias que podem servir como fontes de matéria-prima para a produção de gás de síntese são identificados por meio de revisão da literatura. Em seguida, as indústrias são priorizadas e selecionadas levando em consideração o cenário brasileiro. Para a seleção, é utilizada uma matriz de avaliação com foco em um futuro descarbonizado. Finalmente, os processos convencionais das indústrias selecionadas são analisados para identificar os subprodutos e resíduos adequados para a produção de gás de síntese.

3.1. Fontes de matéria-prima para a produção direta de gás de síntese

Na Tabela 8, são mostradas as fontes potenciais de matéria-prima com seus possíveis processos de conversão. A lista é resultado de uma revisão de literatura com foco em fontes estacionárias cujos subprodutos industriais e resíduos podem ser convertidos diretamente em gás de síntese. Todas as fontes de matéria-prima listadas estão disponíveis no Brasil. Embora apenas subprodutos industriais de baixo valor e resíduos sejam considerados neste estudo (portanto excluindo-se os combustíveis fósseis, a biomassa vegetal e o biogás), as demais indústrias também são mencionadas.

Tabela 8: Fontes de matéria-prima para a conversão direta de gás de síntese e seus processos de conversão. Fonte: elaboração própria

Fonte	Processo de conversão
Combustíveis fósseis • Carvão, coque de petróleo, petróleo • Gás natural	• Gaseificação • Reforma de gás natural
Biomassa vegetal	Gaseificação de lignocelulose
Agroindústria • Resíduos agrícolas e animais • Bioetanol • Biodiesel • Biogás • Resíduos florestais	• Gaseificação de biomassa • Gaseificação de bagaço • Reforma ou gaseificação de glicerol • Reforma de metano • Gaseificação de biomassa
Resíduos urbanos • Resíduos sólidos urbanos • Tratamento de águas residuais	• Gaseificação • Reforma de metano
Indústria de papel e celulose	Gaseificação de cascas e licor negro

3.2. Fontes de matéria-prima para a produção indireta de gás de síntese

As fontes de CO₂ para a produção indireta de gás de síntese foram identificadas com base na literatura e em critérios específicos. Um critério é que sejam locais fixos que emitem CO₂ concentrado em seus processos industriais. De acordo com o IPCC (2005), existem grandes fontes estacionárias (> 0,1 Mt CO₂ por ano) e pequenas fontes estacionárias (<0,1 Mt CO₂ por

ano). Quanto às pequenas fontes estacionárias, este estudo identificou apenas indústrias consideradas fontes de alta pureza com concentração de CO₂ de 30%–100% (Patricio et al., 2017).

O CO₂ emitido pelas indústrias deve ser capturado por uma tecnologia de captura de carbono para ser usado na produção de gás de síntese (ver também Capítulo 2). As indústrias mencionadas na Tabela 9 foram encontradas na literatura e representam fontes estacionárias que são adequadas para Captura, Armazenamento e Utilização de Carbono (CCS e CCU, nas siglas em inglês). A tabela também mostra a fonte de emissão e a concentração de CO₂ no gás de combustão. Incluem-se pequenas fontes estacionárias, como biogás ou bioetanol com alta pureza de CO₂, devido à maior pressão parcial de CO₂, que facilita a captura, e à maior maturidade comercial das tecnologias de captura (IEAGHG, 2017; Patricio et al., 2017). Com exceção da CDA, todas as indústrias listadas existem atualmente no Brasil, mas com importâncias e tamanhos diferentes.

Tabela 9: Fontes de matéria-prima para a conversão indireta de gás de síntese e suas fontes de emissão. Fonte: elaboração própria

Indústria	Fonte de emissão	CO ₂	Fonte
Agroindústria			
Produção de biogás	Processo de purificação	99%	IPCC (2005); Patricio et al. (2017)
Produção de bioetanol	Processo de fermentação	100%	IEAGHG (2017); IPCC (2005) Patricio et al. (2017); Psarras et al. (2017); von der Assen et al. (2016)
Geração de energia a partir de combustíveis fósseis	Turbinas a gás	3%–4%	IPCC (2005); Patricio et al. (2017)
	Caldeiras a gás natural	7%–10%	IPCC (2005); Patricio et al. (2017); von der Assen et al. (2016)
	Caldeiras a óleo	11%–13%	IPCC (2005); Patricio et al. (2017)
	Combustão de carvão	11%–15%	IPCC (2005); Patricio et al. (2017); von der Assen et al. (2016) Psarras et al. (2017)
	CCGI antes/depois da combustão	1%/40%	IPCC (2005); Patricio et al. (2017); von der Assen et al. (2016)
Geração de energia a partir de biomassa	Turbinas a gás	3%–4%	IPCC (2005); Patricio et al. (2017)
Tratamento de resíduos ou incineração	Incineração de resíduos	10%	Patricio et al. (2017)
Produtos minerais			
Indústria de cimento	Fornos de cimento	13%–33%	IEAGHG (2017); IPCC (2005); Patricio et al. (2017)
Produção de cal	Fornos de cal	24%–32%	Psarras et al. (2017); von der Assen et al. (2016)
Indústria de vidro	Vários componentes + calor → CO ₂ + vidro	7%–12%	Patricio et al. (2017); Psarras et al. (2017)

Produção de metal			
Indústria siderúrgica	Alto-forno/forno de aço a oxigênio Top Gas Recycling Blast Furnace (TGRBF) Corex	17%–28%	IEAGHG (2017); IPCC (2005); Patricio et al. (2017)
Produção de alumínio	Processo Hall-Heroult	3%–10%	Patricio et al. (2017); Psarras et al. (2017)
Ferroligas	FeMn/FeSi/FeCr	8%–10%	Psarras et al. (2017)
Magnésio	$2\text{MgO} + \text{C} \rightarrow 2\text{Mg} + \text{CO}_2$	15%	Psarras et al. (2017)
Zinco	Fundição de zinco $\text{ZnO} + \text{CO} \rightarrow \text{Zn} + \text{CO}_2$	15%	Psarras et al. (2017)
Indústria química			
Produção de amônia	Processo de Haber-Bosch	30%–100%	IEAGHG (2017); IPCC (2005); Patricio et al. (2017) Psarras et al. (2017); von der Assen et al. (2016)
Produção de etileno		12%	IEAGHG (2017); IPCC (2005)
Óxido de etileno		30%–100%	IEAGHG (2017); IPCC (2005); Patricio et al. (2017) von der Assen et al. (2016)
Produção de hidrogênio	Adoçamento de gás – refinarias	100%	IEAGHG (2017); IPCC (2005); Patricio et al. (2017) von der Assen et al. (2016)
Processamento de gás natural		100%	IEAGHG (2017); IPCC (2005); Patricio et al. (2017) von der Assen et al. (2016); Psarras et al. (2017)
Manufatura de negro de fumo		2%–5%	Patricio et al. (2017); Psarras et al. (2017)
Refinarias de petróleo <i>onshore/offshore</i>	Caldeira/Forno de processo	8%–24%	IEAGHG (2017); Patricio et al. (2017); von der Assen et al. (2016)
	Craqueador	3%–13%	IEAGHG (2017); Patricio et al. (2017); von der Assen et al. (2016)
Indústria de papel e celulose	Caldeira de recuperação	7%–20%	IEAGHG (2017); Patricio et al. (2017); von der Assen et al. (2016)
	Produção de energia	13,3%	IEAGHG (2017); Patricio et al. (2017); von der Assen et al. (2016)
Industria têxtil	Energia de aquecimento Processo de secagem	9%	Patricio et al. (2017)
Produção de cerveja e vinho	Processo de fermentação	100%	Patricio et al. (2017)
Ar	CDA	400ppm	Climeworks (s.d.); von der Assen et al. (2016)

3.3. Priorização e seleção de indústrias para a produção de gás de síntese

Após serem identificadas como possíveis fontes para a produção direta e indireta de gás de síntese, as indústrias foram examinadas para selecionar aquelas a ser contempladas neste estudo. Usou-se uma matriz de avaliação com três critérios:

- subprodutos ou resíduos adequados para a produção de gás de síntese;
- existência em um futuro descarbonizado;
- participação na produção industrial no Brasil e/ou no mundo.

Conforme explicado anteriormente, as fontes de matéria-prima devem ter resíduos e/ou subprodutos adequados e de baixo valor. Além disso, um critério importante neste estudo resulta da pergunta: “Quais indústrias seguirão existindo em um futuro descarbonizado?” Entende-se que esse futuro seja a partir da metade do século. Esses critérios são usados para eliminar indústrias que têm grandes chances de ser completamente substituídas por um sistema energético descarbonizado ou de mudar seus processos baseados em carbono, como a indústria siderúrgica, que será capaz de usar hidrogênio (Agora Energiewende, 2019). Deve-se mencionar que essa avaliação foi realizada para restringir o número de possíveis indústrias para a produção de gás de síntese neste estudo. Todas as indústrias listadas nas Tabelas 8 e 9 são adequadas para a produção de gás de síntese e podem ser investigadas posteriormente.

Os setores identificados foram categorizados de acordo com a pergunta acima, conforme ilustrado na Figura 14.

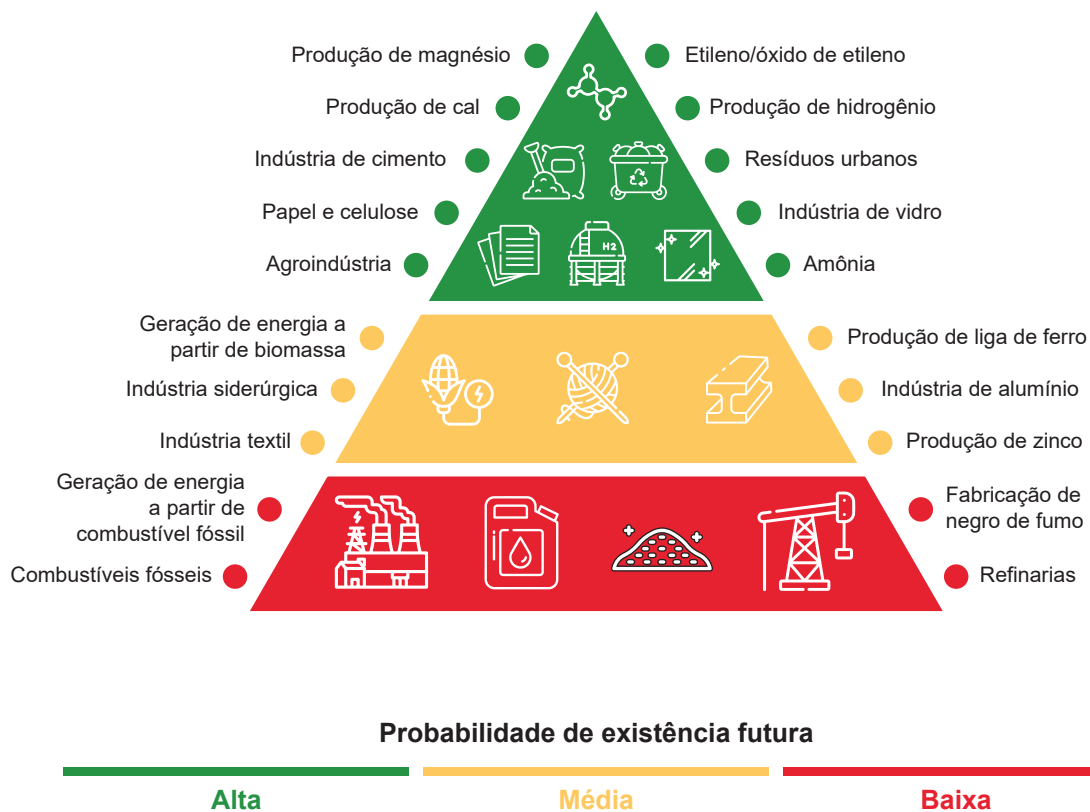


Figura 14: Avaliação das indústrias quanto à sua existência num futuro descarbonizado. Fonte: elaboração própria

O terceiro critério baseia-se na ideia de que o processo de produção industrial acompanha a possível produção de gás de síntese. Isso significa que uma grande produção provavelmente gera mais resíduos e, portanto, implica um potencial maior de gás de síntese. Este último critério refere-se a indústrias que, de acordo com a literatura, possuem subprodutos e resíduos adequados para a produção direta ou indireta de gás de síntese e são compatíveis com conceitos de biorrefinaria e simbiose industrial.

Devido à falta de informações e literatura sobre o atendimento desses critérios por algumas das indústrias identificadas no Brasil, as fontes indiretas (ver Tabela 9) são restritas às indústrias estacionárias identificadas pelo *Atlas Brasileiro de Captura e Armazenamento Geológico de CO₂* (Ketzer et al., 2014). Essas fontes pertencem aos setores de geração de energia (fóssil e biomassa), cimento, siderurgia, refino de petróleo, etanol, etileno e amônia, que representam indústrias altamente adequadas para a captura de carbono no Brasil (Ketzer et al., 2014). Também foi avaliada a produção de ferroligas e alumínio do setor de metal e da indústria de celulose, que já está representada na geração direta de gás de síntese.

Cada setor foi avaliado individualmente, por uma equipe de especialistas munida de premissas embasadas na literatura, em uma escala de 1 a 10, sendo 1 o mínimo e 10 o máximo. Os critérios relativos a um futuro descarbonizado tiveram peso duplo. Os resultados da matriz de avaliação são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10: Matriz de avaliação para a seleção das indústrias adequadas para este estudo. Fonte: elaboração própria

Indústria \ Critério	Existente em um futuro descarbonizado*	Participação na produção industrial	Subprodutos e resíduos adequados	Total
Papel e celulose	10	9	10	9,75
Resíduos urbanos	9	10	9	9,25
Resíduos agroindustriais				
• Cana-de-açúcar, soja, milho e arroz	10	10	9	9,75
• Bovinos, aves e suínos	10	10	9	9,75
• Resíduos florestais	10	10	9	9,75
Geração de energia				
• Combustível fóssil	0	6	8	3,5
• Biomassa	6	7	8	6,75
Refinarias	2	8	9	5,25
Cimento	10	9	9	9,25
Indústria siderúrgica	8	10	10	9
Ferroligas (FeMn, FeSi, FeCr)	10	7	10	9,25
Alumínio	9	6	9	8,25
Etileno e óxido de etileno	9	7	10	8,75
Amônia	9	5	10	8,25

*Nesta avaliação, os critérios relacionados a um futuro descarbonizado têm peso duplo.

A maioria das indústrias foi classificada entre 8 e 10 na matriz de avaliação, exceto o setor de geração de energia e as refinarias, que tiveram as classificações mais baixas. Essa avaliação não rejeita o potencial das indústrias com baixa classificação; no entanto, este estudo se concentrou em indústrias que existirão em um futuro descarbonizado, quando podem vir a obter uma classificação mais baixa.

Neste estudo, apenas as indústrias classificadas de 9 a 10 foram consideradas. A indústria de papel e celulose e o setor agroindustrial foram os mais bem classificados, seguidos por resíduos urbanos, indústria do cimento, produção de ferroligas e indústria siderúrgica. Quanto à agroindústria, levamos em consideração as culturas de cana-de-açúcar, soja, milho e arroz, bem como aves, bovinos e suínos, cujos resíduos apresentam os maiores potenciais de aproveitamento segundo a literatura (Forster-Carneiro et al., 2013). As indústrias de biodiesel, bioetanol e biogás também foram consideradas.

Os resíduos urbanos incluem Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), incineração de resíduos ou biogás do tratamento de efluentes, que são fontes potenciais para a produção de gás de síntese. Essa indústria e seu potencial para gerar gás de síntese serão abordados por outro projeto na GIZ e, portanto, não serão analisados neste estudo. O potencial de resíduos animais e a produção de biogás relacionada, os resíduos florestais e a produção de ferroligas não foram incluídos devido à falta de informações da indústria e/ou de tempo. Os setores analisados em maior detalhe neste estudo foram: cimento, ferro e aço, papel e celulose, cana-de-açúcar, bioetanol, soja, biodiesel, milho e arroz.

3.4. Análise das indústrias selecionadas

Cada indústria selecionada foi analisada considerando o contexto brasileiro. Os subprodutos e resíduos adequados para a produção de gás de síntese foram definidos, e um fluxo de massa do processo industrial foi determinado. Nesta seção, as indústrias são apresentadas e seus subprodutos e resíduos são identificados.

3.4.1. Indústria de cimento

O cimento, como ligante, é um ingrediente essencial do concreto, que é uma das substâncias manufaturadas mais usadas no planeta em termos de volume (IEA, 2018). O concreto é usado na indústria de construção e no desenvolvimento de infraestrutura para fornecer água limpa, saneamento e energia. A indústria brasileira de cimento, organizada principalmente pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), foi responsável por 2% da produção mundial de cimento em 2014 (IEA, 2018). Desde então, a produção caiu quase 30% em razão da crise político-econômica (CNI, 2018). Atualmente, existem 100 fábricas de cimento instaladas no Brasil, com capacidade nominal de 100 milhões de toneladas por ano (Visedo & Pecchio, 2019). Em 2018, foram produzidos 53,55 milhões de toneladas de cimento, basicamente 50% da capacidade nominal (Penna, 2019).

O aumento da população global, a urbanização e o desenvolvimento da infraestrutura estimularão a demanda por concreto e, portanto, por cimento, em especial em países em desenvolvimento, como o Brasil (IEA, 2018), onde essa demanda tem crescido constantemente

desde 2016 (Penna, 2019). De acordo com o *Roadmap tecnológico do cimento* publicado em 2019 pela ABPC e pelo SNIC, a produção brasileira de cimento deverá aumentar no médio a longo prazo em 60%–120% em 2050 em relação a 2014 devido ao elevado déficit habitacional e de infraestrutura no país e ao crescimento populacional (Visedo & Pecchio, 2019).

O setor cimenteiro é o terceiro maior consumidor de energia industrial, com 7% do uso global de energia industrial em 2018 (IEA, 2018), e gera subprodutos e resíduos que podem ocasionar preocupação ambiental. O principal subproduto do processo de fabricação de cimento é o CO₂ como parte do gás de combustão. O Brasil vai aumentar sua produção de cimento para o desenvolvimento do país e, ao mesmo tempo, busca soluções para melhorar a eficiência dessa produção (Visedo & Pecchio, 2019).

No entanto, migrar para combustíveis alternativos como biomassa ou resíduos – o nível de substituição brasileiro atual é de 15% (REN21, 2019) – e aumentar a eficiência ainda resultará em emissões inevitáveis de GEE no processo de produção. O uso desse subproduto pode aumentar a economia geral e a eficiência da produção e indústria de cimento. A seguir, o processo de produção de cimento é analisado para identificar subprodutos que podem ser usados para criar produtos de valor agregado, especialmente gás de síntese.

3.4.1.1. Processo de produção de cimento e seus subprodutos e resíduos

O cimento é um produto mineral não metálico de um processo que envolve alto consumo de energia. O processo de fabricação de cimento tem três estágios: preparação da matéria-prima, produção de clínquer e moagem de clínquer com outros componentes. O cimento pode ser produzido diretamente no local do forno, com as etapas de moagem e mistura integradas, ou em plantas separadas de moagem e mistura. Existem duas rotas básicas de produção: a úmida ou a seca.

No Brasil, 99% das fábricas de cimento utilizam a rota seca, que consome menos energia em comparação com o processo úmido (IEA, 2018; Visedo & Pecchio, 2019). A Figura 15 mostra um processo simplificado de produção de cimento convencional, dividido em suas etapas centrais com intenso consumo de energia. A seguir, as etapas da produção de cimento são apresentadas conforme descrito pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2018).

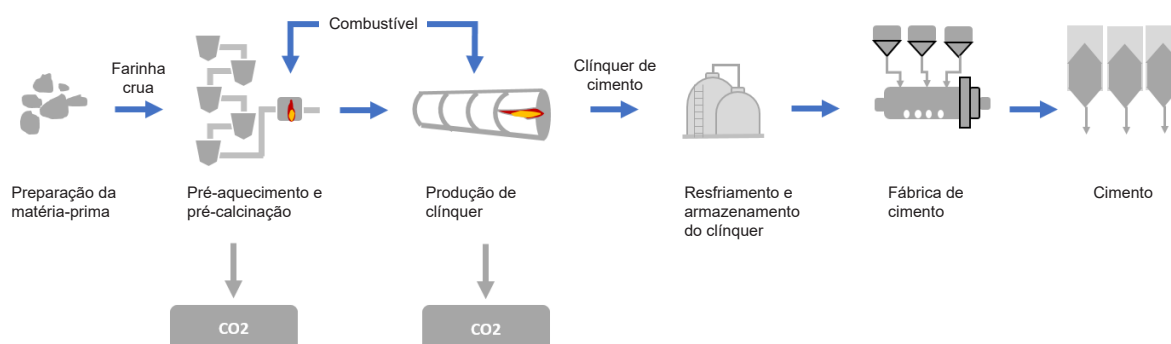
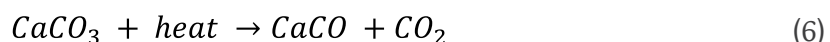


Figura 15: Processo industrial convencional de uma fábrica integrada de produção de cimento. Fonte: elaboração própria

O carbonato de cálcio (CaCO_3) é o ingrediente principal na produção de cimento. Ele é fornecido por depósitos naturais, como calcário, argila ou giz. Essas matérias-primas são extraídas de jazidas geralmente localizadas próximas à fábrica de cimento. Pequenas quantidades de outros materiais, como minério de ferro, argila ou areia, também podem ser escavadas para atender aos requisitos do processo e produto. A mistura de matérias-primas é então moída e homogeneizada para produzir um pó fino, denominado farinha crua (Oliveira et al., 2016).

A farinha crua é passada por um pré-aquecedor, que é uma série de ciclones verticais de até 900°C por gás de combustão quente. A farinha crua pré-aquecida então entra no pré-calcinador, uma câmara de combustão localizada no final do pré-aquecedor, onde mais de 90% do calcário são decompostos quimicamente em cal (CaO) e CO_2 . A reação química da calcinação do calcário é mostrada a seguir:



O CO_2 emitido nessa etapa pode ser devido à calcinação (normalmente 60%–70% do total de emissões de CO_2 na produção de cimento) e devido à queima de combustível, que no Brasil são principalmente combustíveis fósseis, como coque de petróleo, diesel ou gás liquefeito de petróleo. Ambos os fluxos são misturados no gás de exaustão.

Na etapa seguinte, a farinha crua pré-calcinada entra no forno rotativo, onde o combustível é queimado diretamente para atingir temperaturas de até 1450°C . O material desliza em direção à zona mais quente e produz o clínquer. No forno, a calcinação restante é concluída, paralelamente às emissões do processo e às emissões da queima do combustível. Um subproduto desse processo é o pó de forno de cimento, que é composto por partículas micronômicas coletadas de precipitadores eletrostáticos durante a produção do clínquer (Mohammad & Hilal, 2010).

O clínquer produzido no forno rotativo é resfriado rapidamente por um cooler, que sopra o ar de combustão que entra no clínquer. O clínquer resfriado é normalmente armazenado na fábrica. A partir daqui, o clínquer pode continuar a ser processado em plantas integradas ou transportado para uma das 38 plantas de mistura e moagem no Brasil. O clínquer é misturado e combinado a gesso e outros materiais, como cinza ou escória de aço, para formar um pó cinza conhecido como cimento Portland.

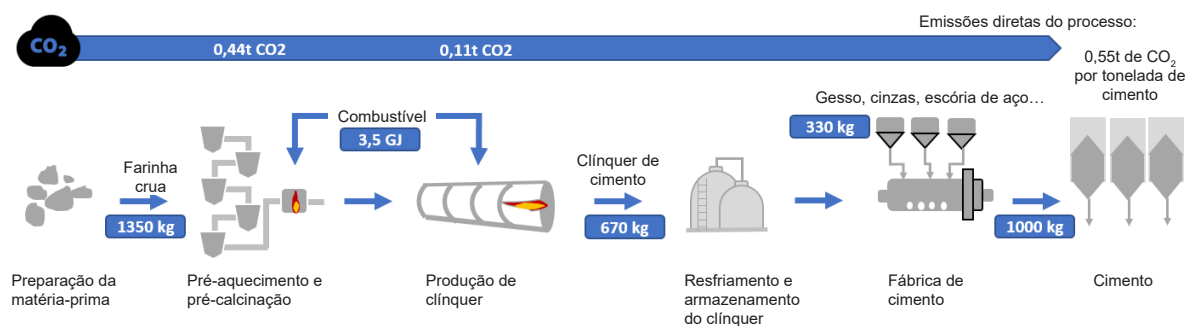
Na produção brasileira de cimento, a queima de combustível responde por 36% das emissões totais, enquanto a calcinação tem participação de 63% (Visedo & Pecchio, 2019). O 1% restante é emitido indiretamente pelo uso de eletricidade, que é relativamente baixo em comparação com a participação das energias renováveis na matriz de eletricidade do país (Visedo & Pecchio, 2019). Segundo Visedo e Pecchio (2019), a indústria brasileira de cimento emite 0,56 tonelada de CO_2 por tonelada de cimento produzido, valor inferior ao fator de emissão na maioria das localidades do planeta. A intensidade de carbono e as emissões diretas de CO_2 pela produção brasileira de cimento resultam das quantidades mostradas na Tabela 11.

Tabela 11: Parcela das emissões de CO₂ nas etapas de produção do cimento. Fonte: adaptado de Visedo e Pecchio (2019)

Emissão de CO ₂	Calcinção (tCO ₂ /tcimento)	Queima de combustível (tCO ₂ /tcimento)
Etapas do processo		
Pré-calinaçãoção	0,317	0,124
Produção de clínquer	0,035	0,076

3.4.1.2. Fluxo de massa da produção de cimento industrial com subprodutos e resíduos

A indústria brasileira de cimento desempenha um papel importante no desenvolvimento do país. De acordo com o *roadmap* elaborado pela ABCP e pelo SNIC em 2019, o Brasil busca aumentar a eficiência dessa indústria, principalmente no que se refere às emissões de CO₂. A captura e utilização do CO₂ emitido também fazem parte do *roadmap*. O uso de CO₂ e o desenvolvimento de produtos de valor agregado por meio do gás de síntese podem aumentar a capacidade produtiva e a eficiência da indústria. A Figura 16 mostra o fluxo de massa para produzir 1 tonelada de cimento Portland convencional a partir de calcário e pequenas quantidades de outros materiais. As emissões de CO₂ do processo são mostradas na parte superior, e o fluxo de massa é retirado de Wang et al. (2014) e Visedo e Pecchio (2019).


Figura 16: Fluxo de massa de um processo industrial integrado de produção de cimento. Fonte: elaboração própria

3.4.2. Indústria siderúrgica

Ferro e aço são materiais metálicos versáteis produzidos no mesmo processo (CNI, 2017, 2018) e aplicados em setores como construção, infraestrutura e indústria automotiva. Eles são usados para fabricar diferentes produtos, equipamentos e tecnologias. O Instituto Aço Brasil (IABr) representa todas as empresas produtoras de aço do país. Em 2018, o Brasil era o 9º maior produtor de aço do mundo, com uma participação de 2% da produção global de aço bruto. Atualmente, são 32 unidades de produção no Brasil, com capacidade nominal de cerca de 51,5 milhões de toneladas de aço bruto por ano produzidas por 12 empresas (IABr, 2019). A produção brasileira de aço bruto atingiu 35,4 milhões de toneladas em 2018, o que representa um aumento de 1,7% em relação aos anos anteriores (IABr, 2019).

A siderurgia é um setor com intenso consumo de energia e responsável por uma série de subprodutos e resíduos que vêm ganhando cada vez mais importância devido ao aumento do consumo e da demanda de aço no Brasil desde 2016 (IABr, 2019). A sustentabilidade dessa

indústria, a otimização da eficiência dos processos e a reciclagem do aço e seus subprodutos são metas do IABr (CNI, 2017). Além do CO₂ emitido durante o processo produtivo, efluentes, coque e poeira de carvão, escória, pó de ferro, lama e sucata são subprodutos e resíduos da produção de ferro e aço que causam preocupação ambiental quando não são geridos adequadamente (CNI, 2017; Sarkar & Mazumder, 2015). O uso desses subprodutos e resíduos aumenta a economia geral e a eficiência do processo de produção. Na seção a seguir, o processo de produção do aço é analisado para identificar subprodutos adequados para a fabricação de produtos de valor agregado, em especial o gás de síntese.

3.4.2.1. Processo de produção de aço e seus subprodutos e resíduos

Existem duas rotas principais de produção de aço: a integrada e a semi-integrada. A diferença entre elas é que a rota integrada tem uma etapa de redução de matéria-prima em alto-forno. No Brasil, 17 unidades de produção são baseadas na rota integrada, com 84,9% da produção total de aço bruto em 2018, e as outras 15 unidades são semi-integradas (ou *mini-mills*), utilizando aço reciclado, com 15,1% da produção (IABr, 2019). O aço é produzido principalmente por dois processos no Brasil: o alto-forno-forno básico a oxigênio (BF-BOF, na sigla em inglês), na rota integrada, ou o forno elétrico a arco (FEA), no caso de fabricação a partir de sucata de aço, na rota semi-integrada. Na Tabela 12, são apresentados os processos siderúrgicos existentes e sua participação na produção brasileira de aço bruto em 2018.

Tabela 12: Processos siderúrgicos utilizados no Brasil em 2018. Fonte: IABr (2019)

Processo siderúrgico	Produção de aço bruto (toneladas)	Participação (%)
Alto-forno-forno básico a oxigênio (BF-BOF)	27.076.000	76,5
Forno elétrico a arco (FEA)	7.820.000	22,1
Forno de energia otimizada (EOF, na sigla em inglês)	511.000	1,4

Na Figura 17, é mostrado o processo produtivo com maior participação no Brasil, ou seja, o de alto-forno convencional integrado. Ele consiste de três etapas principais: preparação da matéria-prima, fabricação de ferro e fabricação de aço.

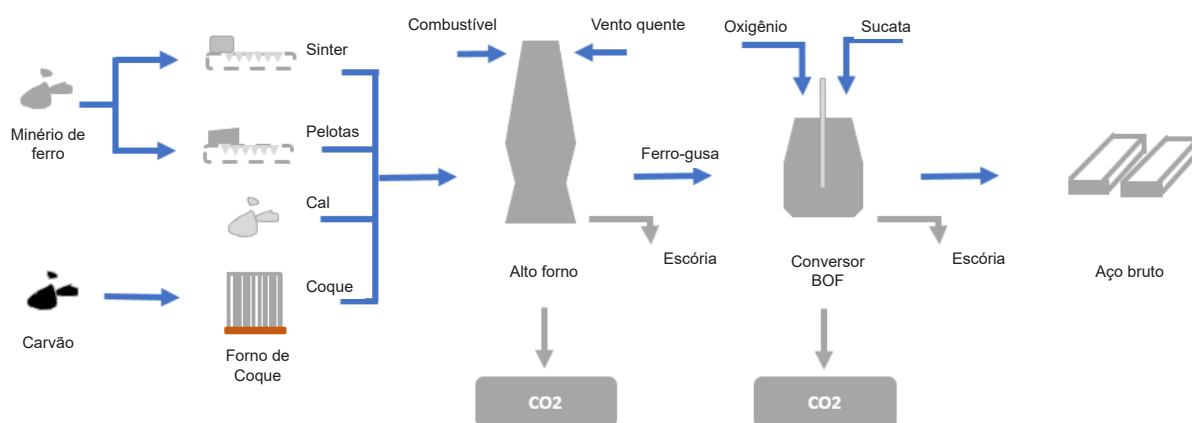
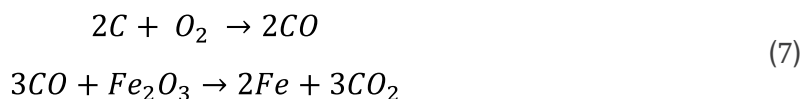


Figura 17: Processo de alto-forno convencional integrado para produção de aço no Brasil. Fonte: elaboração própria

Exemplos de matérias-primas usadas predominantemente nos processos integrados de BF-BOF são minério de ferro (granulado e fino), carvão vegetal, calcário e aço reciclado. A primeira etapa inclui a preparação da matéria-prima por meio de peletizador, planta de sinterização e forno de coque, que são poluentes e geram resíduos sólidos (Almansa & Kroon, 2016). Em uma planta de sinterização, partículas minerais se fundem, originando uma massa porosa pela queima de um combustível (Ispatguru, 2015). O forno de coque é usado para produzir coque, um combustível sólido necessário no processo de fundição, a partir do carvão (American Coke and Coal Chemicals Institute, n.d.). O sinter é utilizado especialmente para melhorar o processo de redução no alto-forno. Na sinterização, uma mistura de minérios finos, carvão/coque e cal é inflamada por uma série de queimadores em um leito de túnel. O processo resulta em emissões de CO₂ e lama como principais subprodutos (Agora Energiewende, 2019; Sarkar & Mazumder, 2015). A pelletização é o processo de conversão do minério de ferro em pelotas de ferro de tamanho uniforme, que passam por secagem em forno rotativo por queima (GIZ, 2018). Como combustível e agente de redução no alto-forno, o coque é processado durante a carbonização do carvão em uma atmosfera deficiente em oxigênio e em altas temperaturas de até 1100°C.

Esse processo também resulta em emissões de CO₂ e resíduos sólidos, como coque e poeira de carvão, lama e resíduos refratários (Sarkar & Mazumder, 2015). Segundo a Agora Energiewende (2019), a etapa de preparação da matéria-prima é responsável por 0,1 tonelada de CO₂ por tonelada de aço bruto produzida em todo o processo. A etapa de fabricação de ferro ocorre na unidade de alto-forno, onde os minérios de ferro (Fe₂O₃ e Fe₃O₄) são reduzidos a ferro na presença de coque e em altas temperaturas de até 2200°C (Agora Energiewende, 2019). Os altos-fornos utilizam carvão primário e coque como combustível (IPCC, 2005). As reações químicas no alto-forno são mostradas a seguir. O produto da reação é denominado metal quente ou ferro-gusa (Almansa & Kroon, 2016).



O principal subproduto desse processo é o CO₂, responsável pela maior parcela das emissões de CO₂ de todo o processo produtivo. Além do CO₂ do alto-forno, há uma grande parcela de CO, que em geral é utilizado no próprio processo e resulta novamente em emissões de CO₂ (Agora Energiewende, 2019). Os resíduos sólidos gerados são escória, poeira de gás de combustão, lama e resíduos refratários (Sarkar & Mazumder, 2015). A escória produzida no BF representa quase metade da participação dos subprodutos gerados em todo o processo (CNI, 2017).

Após a fabricação do ferro, este é convertido em aço bruto no BOF. A fabricação de aço é exotérmica e é o processo produtivo que menos consome energia. O BOF reduz o metal quente e, se disponível, a sucata ao lançar oxigênio em alta pressão (GIZ, 2018). Durante a redução, é emitido CO₂, cuja participação, segundo a Agora Energiewende (2019), é de 12% das emissões totais de CO₂ no processo. A indústria siderúrgica busca aumentar sua eficiência energética. Grande parte de seus subprodutos já é reciclada e utilizada tanto para a geração de produtos de valor agregado quanto como matéria-prima em outras indústrias.

Atualmente, cerca de 87% dos resíduos sólidos produzidos são reaproveitados seja no próprio processo, seja por terceiros, como a indústria do cimento ou outras indústrias (CNI, 2017). Além disso, os efluentes líquidos são reaproveitados em até 95% e resultam em aproxima-

damente 5,8 m³ de efluentes por tonelada de aço bruto (CNI, 2017). O CO₂ emitido durante o processo é o principal subproduto, mas geralmente não é utilizado, sendo liberado na atmosfera. No entanto, ele pode ser usado como matéria-prima e convertido indiretamente em gás de síntese.

O fator de emissão para produzir aço bruto no Brasil é de 1,9 tonelada de CO₂ por tonelada de aço bruto produzida (CNI, 2017). As emissões de CO₂ em cada etapa do processo, calculadas de acordo com as parcelas de emissão de Agora Energiewende (2019), são mostradas na Figura 18. Especialmente as etapas de BF e BOF são responsáveis pelas principais emissões e são fontes adequadas de captura de CO₂. Além do processo integrado de alto-forno, a rota FEA responde por 22,1% da produção brasileira de aço. A *mini-mill*, em que o aço é feito por derretimento de sucata de aço ou substitutos de sucata usando a rota FEA, é responsável por cerca de 0,3 tonelada de CO₂ por tonelada de aço bruto produzido (Agora Energiewende, 2019), e sua eletricidade é principalmente de base renovável (CNI, 2017). Devido à sua participação em comparação ao processo de alto-forno, consideramos apenas o processo BF para a geração de gás de síntese pela indústria siderúrgica. A produção potencial de gás de síntese e a distribuição regional da indústria siderúrgica brasileira são apresentadas no Capítulo 4.

3.4.2.2. Fluxo de massa da produção de aço industrial com subprodutos e resíduos

A indústria siderúrgica brasileira desempenha um papel importante no desenvolvimento do país. O Brasil busca aumentar a eficiência do processo de produção de aço e já caminha para uma economia circular. Os objetivos dessa indústria são principalmente a continuação do uso e a reciclagem de seus subprodutos e a redução de suas emissões de CO₂ (IABr, 2019). A captura e o uso do CO₂ e a conversão em produtos de valor agregado por meio do gás de síntese podem aumentar a produção e a eficiência da indústria. Para produzir 1 tonelada de aço bruto, a rota integrada utiliza 1.400 kg de minério de ferro, 800 kg de carvão, 300 kg de calcário e 120 kg de aço reciclado (Worldsteel Association, 2016). Na Figura 18, é mostrado o fluxo de massa para produzir 1 tonelada de aço bruto.

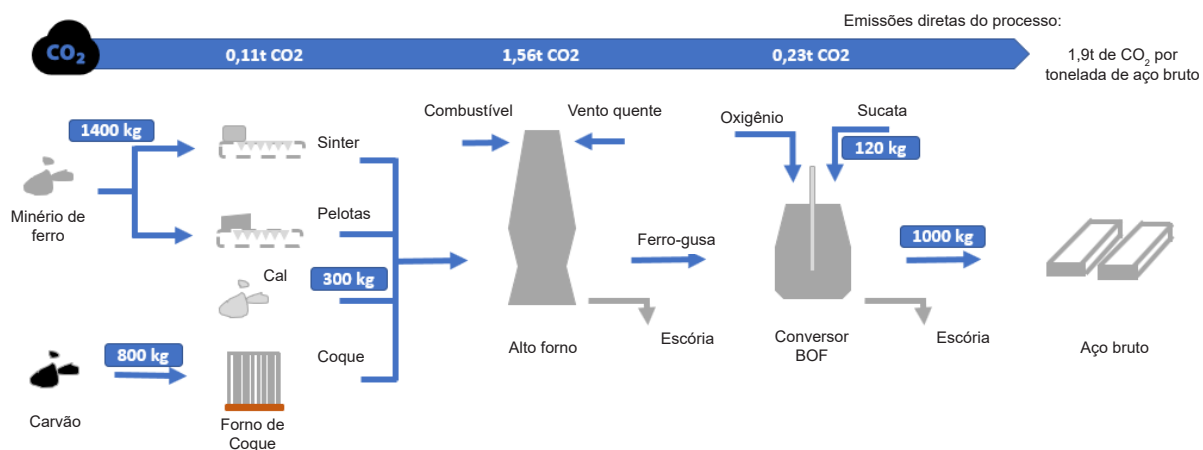


Figura 18: Fluxo de massa de um processo convencional de fabricação de aço em alto-forno no Brasil. Fonte: elaboração própria

3.4.3. Indústria de papel e celulose

A indústria de papel e celulose produz celulose, papel, papelão e outros produtos à base de celulose. Esses produtos são usados em uma variedade de aplicações diárias, desde papel para escrever até papelão como material de embalagem. O principal material para papel e papelão são as diferentes formas de celulose, que por sua vez são de base biológica e feitas principalmente de madeira ou outras matérias-primas contendo fibras de celulose (Roth et al., 2016). No Brasil, quase 96% das matérias-primas utilizadas são de origem arbórea. Do total de 7,83 milhões de hectares de árvores plantadas no Brasil em 2018, 36% pertenciam a empresas do setor de papel e celulose (IBÁ, 2019).

Esse setor é representado pela Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). Segundo a IBÁ (2019), o Brasil é o segundo maior produtor de pasta de celulose e o maior exportador mundial. Em 2018, o país produziu 21,1 milhões de toneladas de polpa de alto rendimento, o equivalente a um aumento de 8% em relação ao ano anterior. De 2012 a 2018, a produção brasileira de celulose aumentou 7,1 milhões de toneladas, o que representa uma taxa de crescimento anual de 7,1%, principalmente devido à expansão das exportações para China e países europeus (IBÁ, 2019). O Brasil é o oitavo fabricante mundial de papel, com uma produção de 10,4 milhões de toneladas em 2018, o que representa uma ligeira queda de 0,4% em relação a 2017. A produção de papel, que se destina principalmente ao mercado interno, aumentou 2% entre 2012 e 2018 (IBÁ, 2019).

Papel e celulose é um dos setores que mais consomem energia no Brasil, com 4,8% do consumo total do país em 2016 (EPE, 2018). Celulose e papel são *commodities* essenciais de uso internacional e sua produção vem crescendo no Brasil, em especial devido ao aumento das exportações e às condições climáticas favoráveis para as matérias-primas (DEPEC, 2019; IBÁ, 2019). O Brasil é altamente eficiente e competitivo principalmente na produção de pasta de celulose (Hora, 2017; Hora et al., 2017). Para manter essa competitividade, a indústria brasileira de papel e celulose deve se reposicionar no mercado, principalmente por meio do desenvolvimento de bioprodutos em fábricas de celulose (Hora et al., 2017).

O processo produtivo da indústria de papel e celulose resulta na formação de efluentes, gases residuais e resíduos sólidos, que causam preocupação ambiental quando não são geridos adequadamente (Mladenov & Pelovski, 2010). Alguns dos subprodutos e resíduos mais importantes dessa indústria são licor negro, lodo, cascas, cavacos, cinzas de caldeira e emissões de resíduos, como CO₂ (CEPI, 2003). Embora os resíduos da indústria tenham diminuído, a eliminação completa não é viável (CEPI, 2003). Seu uso como matéria-prima em outras indústrias e em um conceito de biorrefinaria pode aprimorar a economia em geral, a sustentabilidade e a eficiência do processo para reposicionar as indústrias de papel e celulose no mercado (Hora, 2017; Hora et al., 2017). Na próxima seção, o processo industrial convencional é analisado para identificar os subprodutos e resíduos adequados para a fabricação de produtos de valor agregado, especialmente o gás de síntese.

3.4.3.1. Processo de produção de celulose e seus subprodutos e resíduos

As fábricas de papel e celulose podem ser integradas, produzindo a celulose e o papel no local, ou separadas, caso em que a celulose passa por um processo de secagem e prensagem em fardos antes de ser transportada para as fábricas de papel (Roth et al., 2016). O processo de produção industrial de papel e celulose pode ser dividido nas seguintes etapas principais: preparação da madeira, polpação e fabricação de papel.

Preparação da madeira: as árvores utilizadas como matéria-prima na indústria brasileira de papel e celulose são principalmente o eucalipto (fibra curta), com consumo de 77 milhões de toneladas, seguido do pinus (fibra longa), com 15 milhões de toneladas. O consumo de eucalipto e pinus representou 98% do total consumido em 2018 (IBÁ, 2019). As árvores plantadas são cortadas em toras de madeira e transportadas para os locais de produção. Os resíduos florestais geralmente são deixados para trás para fornecer nutrientes ao solo (EPE, 2018). Em seguida, as toras de madeira são descascadas, picadas e trituradas em tamanho uniforme, adequado ao processo de polpação. A casca das toras e os cavacos menores, impróprios para a produção de celulose, tornam-se subprodutos e resíduos. Eles são reutilizados como biocombustível para geração de eletricidade e calor em uma caldeira de biomassa por algumas fábricas de papel e celulose (EPE, 2018; Kuparinen et al., 2019). Como são derivados da madeira e têm base biológica, esses subprodutos podem ser convertidos termoquimicamente em gás de síntese (Kuparinen & Vakkilainen, 2017; Onarheim et al., 2018).

Polpação: é a etapa inicial e a origem da maior parte dos subprodutos gerados pela indústria de papel e celulose. A madeira usada nesse processo contém fibras celulósicas, lignina e hemiceluloses. O objetivo da polpação é quebrar a estrutura dessa matéria-prima nas fibras constituintes. Processos químicos e mecânicos são as principais etapas de separação das fibras de celulose para a produção da polpa (EPE, 2018). Método de polpação predominante no mundo, o processo químico representa 95% da produção brasileira (DEPEC, 2019; IBÁ, 2019). A Figura 19 mostra um processo kraft simplificado de produção de papel e celulose, com foco na polpação química.

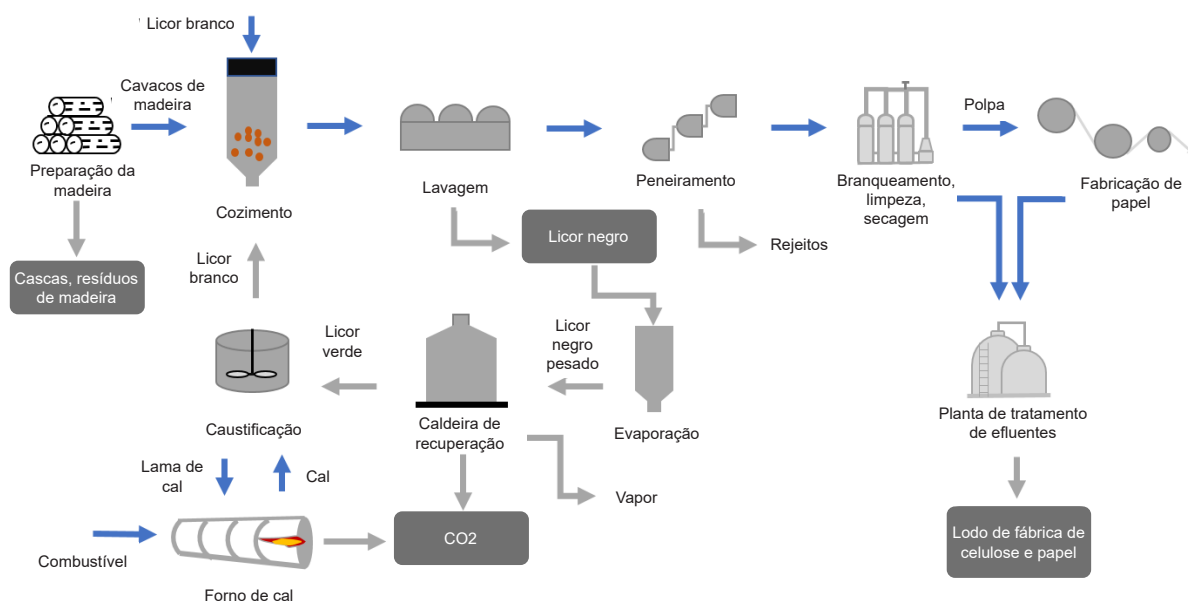


Figura 19: Processo kraft simplificado de produção de papel e celulose. Fonte: elaboração própria

O processo predominante de polpação química é o processo kraft (ou sulfato), que separa os componentes não celulósicos da madeira adicionando ao digestor uma mistura alcalina chamada licor branco e deixando intactas as fibras de celulose (Roth et al., 2016). A chamada etapa de cozimento resulta em uma massa marrom que é lavada em 3–5 estágios para separar a polpa dos produtos químicos usados no cozimento, da lignina degradada e da hemicelulose. Nesta etapa, um fluxo líquido denominado licor negro fraco é formado a partir da lignina degradada e da hemicelulose, junto dos produtos químicos usados na polpação (Tran & Vakkilainen, 2007).

O licor negro é o principal subproduto do processo de produção de papel e celulose. No processo kraft, aproximadamente metade da madeira que entra no processo de cozimento é convertida em celulose, e o licor negro formado é reaproveitado e queimado na caldeira de recuperação (Kuparinen & Vakkilainen, 2017). O licor negro é enviado para o sistema de recuperação kraft, onde os produtos químicos inorgânicos da polpação são recuperados para reutilização, enquanto os orgânicos dissolvidos são geralmente usados como combustível para produzir vapor e energia (Tran & Vakkilainen, 2007). Conforme mostrado na Figura 19, o licor negro é evaporado até atingir um teor mais alto de sólidos secos antes de ser queimado na caldeira de recuperação.

A caldeira de recuperação produz gases de exaustão que são utilizados para produzir vapor e resultam em emissões biogênicas de CO₂ com um fator de 1,6–2,4 toneladas de CO₂ por tonelada de celulose seca ao ar (Kuparinen et al., 2019). O licor remanescente no fundo da caldeira é dissolvido em água para formar o licor verde. Este, por sua vez, é enviado para a caustificação, onde reage com a cal do forno de cal, resultando novamente em licor branco, e retorna ao digestor para reaproveitamento na polpação (Tran & Vakkilainen, 2007). No forno de cal, combustíveis fósseis são usados principalmente para reduzir a lama de cal a cal na presença de altas temperaturas. O forno de cal normalmente é alimentado com óleo quando a fábrica não está localizada perto da rede de gás natural. O forno de cal é a única das operações normais que utiliza combustíveis fósseis, principalmente óleo ou gás natural, produzindo 0,1–0,25 tonelada de CO₂ por tonelada de celulose seca ao ar (Kuparinen et al., 2019).

Após o processo de polpação, vem a etapa de peneiramento, em que a polpa é separada de estilhas, nós, sujeira e outros detritos. O material separado da polpa, denominado rejeito, é parcialmente reprocessado e enviado de volta ao processo de polpação. Após o peneiramento, a celulose pode ser branqueada, limpa e seca para ser transformada em papel em uma fábrica integrada ou transportada para uma fábrica de papel.

Fabricação de papel: a polpa é misturada em água com outros aditivos (argila, giz ou dióxido de titânio) em uma pasta e posteriormente transformada em papel. Como os principais subprodutos adequados para a produção de gás de síntese são gerados antes do processo de fabricação de papel, não detalharemos esta etapa.

A produção de papel e celulose requer grandes quantidades de água, o que gera efluentes que precisam passar por uma estação de tratamento antes de ser lançados no ambiente (Faubert et al., 2016). O subproduto desse tratamento é um resíduo orgânico denominado lodo de papel e celulose (CEPI, 2003; EPE, 2018). Em geral, cerca de 40 kg–50 kg de lodo de papel e celulose são gerados na produção de 1 tonelada de papel (Cho et al., 2017). Esse lodo pode ser usado para aplicação no solo, recuperação de energia, integração em materiais ou aterros (Faubert et al., 2016). Embora ele seja comumente enviado para aterros, a indústria tem se deparado com regras e práticas de gestão mais rígidas (Cho et al., 2017). Existem diferentes métodos para tratar esse resíduo orgânico, como digestão anaeróbia, fermentação ou processos termoquímicos. Entre eles, os processos termoquímicos, como pirólise e gaseificação para gás de síntese, trazem vários recursos benéficos além da recuperação de energia.

3.4.3.2. Fluxo de massa da produção de celulose industrial com subprodutos e resíduos

Celulose e papel, por ser uma das indústrias com maior consumo de energia do Brasil, e o crescimento da produção de celulose estimulam os esforços para aumentar sua eficiência e rumar para uma economia circular (EPE, 2018). De acordo com o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), a agenda da celulose está baseada no desenvolvimento e na aplicação do conceito de biorrefinarias integradas para aproveitar seus subprodutos e resíduos na criação de produtos de valor agregado e manter a competitividade da indústria no longo prazo (DEPEC, 2019). Os produtos de valor agregado obtidos por meio do gás de síntese podem melhorar a economia em geral e a sustentabilidade para reposicionar essa indústria no mercado. A Figura 20 apresenta um fluxo simplificado de massa e energia de uma fábrica de celulose kraft a partir de eucalipto localizada na América do Sul (Kuparinen & Vakkilainen, 2017).

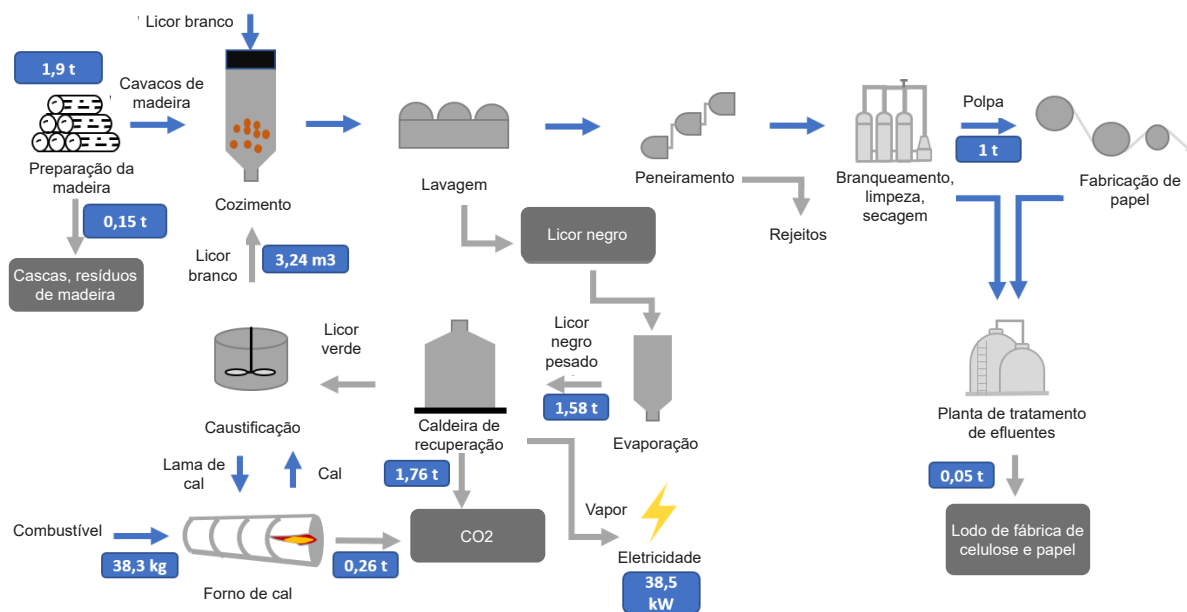


Figura 20: Fluxo de massa de uma fábrica de celulose kraft a partir de eucalipto na América do Sul. Fonte: elaboração própria

3.4.4. Agroindústria

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção e exportação de *commodities* agrícolas e animais. O país tem papel importante no mercado global de biomassa – projeta-se que até 2030 um terço dos produtos comercializados sejam brasileiros, principalmente devido ao aumento da demanda na Ásia (Forster-Carneiro et al., 2013). O setor agroindustrial brasileiro gera biomassa significativa por meio da colheita e do processamento de produtos agrícolas como cana-de-açúcar, soja, milho, algodão, arroz, trigo, mandioca, café e tabaco (Portugal et al., 2014).

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), em 2018, o Brasil ocupava o quinto lugar no mundo e o primeiro na América do Sul em produção anual de grãos, gerando cerca de 117 milhões de ha por ano, principalmente devido ao seu clima favorável (FAO, 2021). A produção pecuária no Brasil inclui aves, bovinos e suínos e é principalmente extensiva, desenvolvida em grandes áreas com baixo nível de aplicação de tecnologia (Forster-Carneiro et al., 2013). O setor agroindustrial produz grande quantidade de subprodutos e resíduos anualmente. Esses resíduos podem causar problemas ambientais

e poluição e ser prejudiciais à saúde humana e animal se não forem descartados adequadamente (Sadh et al., 2018).

A maior parte dos resíduos não é tratada, sendo subutilizada e, muitas vezes, descartada por meio de queima, despejamento ou deposição em aterro não planejado (Sadh et al., 2018). Seu uso como matéria-prima vem se tornando mais interessante do ponto de vista econômico e ambiental. A maior parte dos resíduos do setor agroindustrial brasileiro, que são renováveis e praticamente gratuitos e não ameaçam a disponibilidade de alimentos, representa uma fonte potencial de matéria-prima para a produção de bioenergia ou outros produtos de valor agregado, como o gás de síntese (Welfle, 2017). A utilização desses resíduos como matéria-prima pode auxiliar na redução dos custos de produção, contribuir para a reciclagem de resíduos e diminuir os impactos ambientais do setor agroindustrial (Sadh et al., 2018).

Exemplos de resíduos agrícolas são folhas, raízes, caules, cascas, bagaço, palha e sementes (Forster-Carneiro et al., 2013). Os resíduos agrícolas são geralmente compostos por celulose, hemicelulose e lignina e podem ser considerados matérias-primas para a produção de gás de síntese por conversão termoquímica. Em Forster-Carneiro et al. (2013) e Portugal et al. (2014), foi estudado o potencial de resíduos agrícolas e rejeitos para conceitos de biorrefinaria no Brasil. Concluiu-se que as culturas mais promissoras em termos de aproveitamento potencial de resíduos são cana-de-açúcar, soja, milho e arroz. A seguir, essas indústrias são analisadas em mais detalhes.

3.4.4.1. Indústria de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é a cultura mais produzida no mundo, sendo o Brasil o maior produtor global. Principal matéria-prima da indústria brasileira de açúcar e bioetanol, esse é o produto mais colhido no país, com cerca de 674 milhões de toneladas em 2018 (IBGE, 2019). A produção de cana-de-açúcar acompanha a crescente fabricação e exportação de açúcar e etanol. No Brasil, a cadeia de abastecimento do etanol quase sempre está integrada à produção de açúcar (Bajay et al., 2010). A Figura 21 mostra um esquema simplificado de um processo de produção industrial típico de primeira geração.

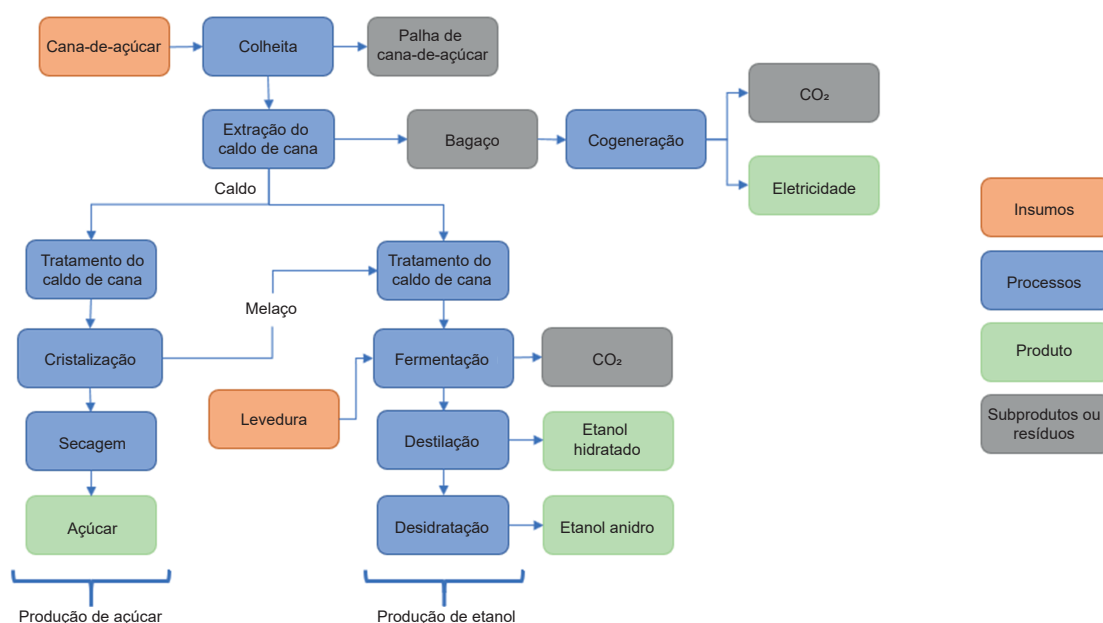


Figura 21: Esquema simplificado de um processo de conversão de cana-de-açúcar industrial típico de primeira geração. Fonte: adaptado de Dias et al. (2015) e Fritsche et al. (2016)

A Figura 21 traz os principais insumos e produtos, bem como os subprodutos e resíduos da indústria da cana-de-açúcar. O processamento da cana produz palha (folhas e pontas), durante a colheita, além de bagaço e CO_2 durante a produção de açúcar e etanol, conforme será descrito a seguir.

3.4.4.1.1. Colheita

A partir do cultivo da cana-de-açúcar, o processo de colheita inclui as operações no campo e o transporte da safra até a usina, geralmente feito por caminhões e reboques (Lamsal et al., 2013). O principal resíduo da colheita é a palha da cana-de-açúcar. As operações de colheita no campo podem ser feitas manual ou mecanicamente (Sampaio et al., 2019). Na colheita manual, os resíduos são previamente queimados, o que permite que catadores manuais realizem a colheita com mais facilidade. Esse processo de queima tem impactos negativos no meio ambiente, na saúde humana e no valor energético potencial da planta. A colheita mecânica elimina a necessidade de queima e aumenta a produtividade (ELLA, n.d.). No Brasil, está havendo transição da colheita manual para a mecanizada, de modo que esse resíduo vem ganhando cada vez mais importância (Sampaio et al., 2019). A palha da cana-de-açúcar pode ser usada, em vez de queimada, para gerar produtos de alto valor agregado por meio da conversão termoquímica, como o gás de síntese.

De acordo com Forster-Carneiro et al. (2013), cada tonelada de cana resulta em 220 kg de folhas e pontas, considerando-se um teor de umidade de 80%–85% e uma perda de resíduos de 30%–50% que permanecem no campo. Carvalho et al. (2019) relatam que cada tonelada de cana resulta em 0,22 tonelada de palha com uma disponibilidade do resíduo (DR) de 65%. A EPE também fornece informações sobre o fator para estimativa da palha de cana no SI Energy. Esse é um modelo para cálculo do potencial energético de resíduos agrícolas que pressupõe que cada tonelada de cana resulta em 0,14 tonelada de palha e que apenas 40% da palha da cana é coletada nos campos (EPE, 2021).

Tabela 13: Fatores para a geração da palha da cana-de-açúcar. Fonte: elaboração própria

Fator (ton)	DR	Fonte
0,22	100%	Forster-Carneiro et al. (2013)
0,22	65%	Carvalho et al. (2019)
0,14	40%	EPE (2021)

Neste estudo, calculamos a média desses fatores, considerando a DR, para o fator de conversão. Isso resultou em um fator de 0,14 tonelada de palha para cada tonelada de cana-de-açúcar colhida.

3.4.4.1.2. Produção de açúcar e bioetanol

Os principais produtos da indústria brasileira de cana-de-açúcar são açúcar e etanol. O Brasil tem uma longa história de exportação e produção de cana-de-açúcar. Hoje, o país é o maior exportador de açúcar do mundo e o segundo maior produtor depois da Índia. Uma variedade de fatores levou, em meados da década de 1970, ao crescente desenvolvimento e produção

de etanol, especialmente para uso como combustível (Lago et al., 2012). A mistura de etanol no Brasil começou com o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) em 1975. Desde então, o percentual de mistura do etanol na gasolina aumentou de 4,5% em 1977 para os atuais 27% (E27), resultando em 33,06 bilhões de litros de etanol produzidos em 2018 – 15,6% a mais que em 2017 (ANP, 2019).

O Brasil é o segundo maior produtor de etanol, logo atrás dos Estados Unidos, e o líder mundial na produção de etanol de cana-de-açúcar. As fontes mais comuns do etanol de primeira geração são o milho e a cana-de-açúcar. Na Tabela 14, é apresentado o uso das matérias-primas brasileiras para o etanol combustível e sua participação na produção nacional de etanol em 2018 (Barros & Flake, 2019). A cana-de-açúcar é a principal fonte de matéria-prima para a produção de etanol, com participação de 99,5%, seguida do milho e do bagaço da cana, que são usados pelas poucas plantas de produção de etanol de segunda geração existentes (ANP, 2019; Barros & Flake, 2019).

Tabela 14: Uso de matéria-prima brasileira para produção de etanol em 2018. Fonte: adaptado de Barros & Flake (2019)

Matéria-prima	Uso de matéria-prima (toneladas)	Participação na produção de etanol (%)
Cana-de-açúcar	404.163.000	99,5
Milho	1.897.000	0,48
Bagaço para etanol celulósico	139	0,02

Conforme mostrado na Figura 21, a matéria-prima do açúcar e do etanol é o caldo da cana-de-açúcar, que é extraído pela moagem das safras. Depois de tratado e limpo de impurezas, o caldo é usado para a produção de açúcar e etanol. Durante a produção de açúcar, uma solução residual concentrada, obtida após a cristalização do açúcar (melaço), é misturada ao caldo de cana para uso na produção de etanol (Dias et al., 2015). Também chamado de álcool etílico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), o etanol é produzido pela fermentação do caldo da cana com levedura. Durante o processo de fermentação, é liberado um fluxo relativamente puro de CO_2 (99%) que pode ser usado como matéria-prima e convertido indiretamente em gás de síntese.

Esse fluxo de CO_2 liberado não requer tecnologia específica de captura de carbono na pressão atmosférica. Portanto, a captura de CO_2 do processo de fermentação representa uma oportunidade viável de conversão em produtos de valor agregado. Segundo Restrepo-Valencia e Walter (2019), o processo de fermentação resulta em 0,96 kg de CO_2 por kg de etanol hidratado ou anidro produzido. O etanol hidratado produzido pela destilação do produto da fermentação pode ser usado diretamente em motores movidos a etanol ou em veículos *flex fuel*, que funcionam com uma mistura variável de gasolina e etanol. O etanol anidro, com pureza acima de 99%, necessita de uma etapa adicional de desidratação e é misturado à gasolina para uso em motores convencionais Otto (Bajay et al., 2010). O etanol hidratado é o biocombustível mais consumido pela frota brasileira de veículos leves e o principal produto da produção brasileira de etanol, com participação de 71% em 2018 (ANP, 2019).

Outro importante subproduto desse processo industrial é o bagaço da cana-de-açúcar, que resulta da moagem e extração do caldo da cana. Esse subproduto é utilizado nas usinas de

açúcar como combustível para suprir sua demanda de energia. O vapor e a eletricidade gerados durante o processo de cogeração não apenas garantem o autoabastecimento, mas também muitas vezes fornecem um excedente substancial que é vendido a empresas de distribuição de eletricidade ou grandes consumidores, especialmente na entressafra (Dias et al., 2015). De acordo com Restrepo-Valencia e Walter (2019) e Forster-Carneiro et al. (2013), cada tonelada de cana resulta em aproximadamente 0,27–0,28 tonelada de bagaço com 50% de umidade. Carvalho et al. (2019) consideram que cada tonelada de cana resulta em 0,22 tonelada de bagaço com uma DR de cerca de 10% devido à cogeração e ao autoabastecimento. O processo de cogeração também resulta em emissões de CO₂ que podem ser capturadas por uma tecnologia de captura de carbono e posteriormente utilizadas para conversão em gás de síntese. Neste estudo, isso é categorizado como “geração de energia a partir de biomassa” e não é analisado em maior profundidade conforme a matriz de avaliação neste capítulo.

Maior indústria de biocombustíveis no Brasil, a indústria do etanol deve continuar crescendo na próxima década com a mistura de 27% à gasolina. Uma expansão ainda maior pode decorrer principalmente da elevação do consumo brasileiro de etanol e do RenovaBio, que introduz a precificação do carbono na política brasileira de combustíveis. O processo de produção convencional dominante (primeira geração) resulta em subprodutos e resíduos que podem gerar graves problemas ambientais e econômicos se não forem tratados adequadamente. O aumento da produção de etanol de primeira geração traz desvantagens, como o uso crescente do solo e a dependência do custo da matéria-prima e do preço final de seus produtos (Lenartsson et al., 2014). As plantas de etanol lignocelulósico de segunda geração no Brasil visam a uma indústria de etanol mais sustentável, mas seu crescimento é pequeno (Lenartsson et al., 2014). Os subprodutos e resíduos mais importantes da indústria de cana-de-açúcar são palha de cana, bagaço e CO₂.

Um conceito de biorrefinaria pode aproveitar os subprodutos e resíduos como matérias-primas para a obtenção de produtos de maior valor agregado, que podem beneficiar econômica, social e ambientalmente essa indústria.

3.4.4.2. Indústria de soja

A soja é a segunda maior cultura agrícola no Brasil, logo depois da cana-de-açúcar. Em 2018, o Brasil era o segundo maior produtor, logo atrás dos Estados Unidos, e o primeiro exportador do mundo. A soja é considerada uma das mais importantes e rentáveis *commodities* de exportação do país (IBGE, 2019). Cerca de 117 milhões de toneladas de soja foram colhidas no Brasil em 2018, uma produção que vem aumentando a cada ano (IBGE, 2019). Paralelamente à exportação, o uso da soja como ração para gado ou alimento tradicional é um fator-chave no aumento da produção brasileira. Desde o início do século 21, a indústria do biodiesel também desempenha um papel importante na indústria brasileira da soja por meio do aproveitamento de seus subprodutos. Na Figura 22, é mostrado um esquema simplificado da indústria da soja e o processo interligado de produção industrial do biodiesel.

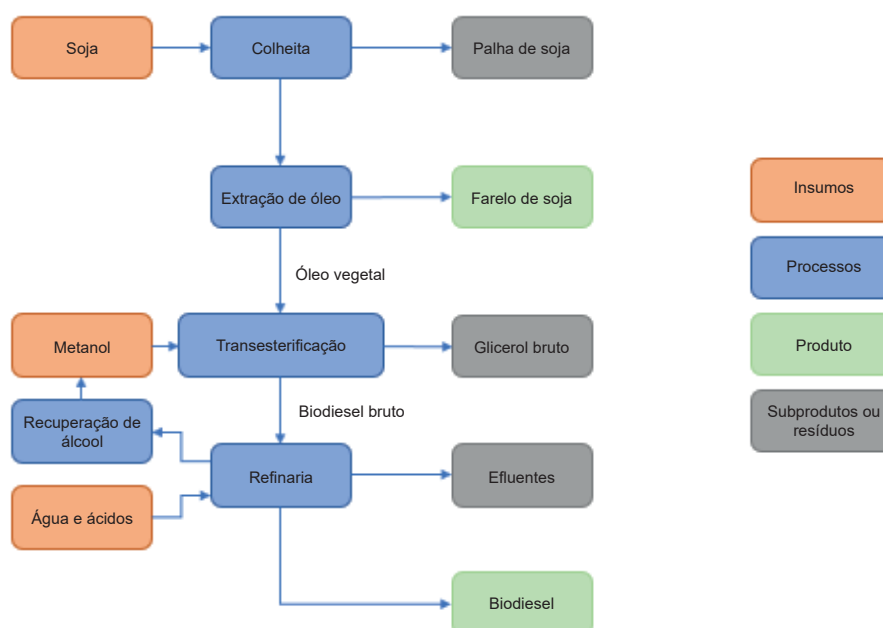


Figura 22: Esquema simplificado da indústria da soja e processo interligado de produção industrial do biodiesel. Fonte: elaboração própria

Além dos processos principais, a Figura 22 mostra os insumos e produtos, bem como os subprodutos e resíduos da indústria da soja. Os subprodutos e resíduos da colheita da soja são a palha de soja (Portugal et al., 2014). O óleo vegetal resultante da moagem da soja é utilizado como principal matéria-prima para a produção de biodiesel, que gera subprodutos e resíduos como glicerol e efluentes. Neste estudo, esse processo industrial é dividido em duas partes: a colheita e a produção da soja e do biodiesel. Ambos são discutidos a seguir.

3.4.4.2.1. Colheita

As operações de colheita no campo resultam em palha de soja. Esse resíduo inclui talos, caules e folhas, que geralmente são descartados no campo (Portugal et al., 2014). No entanto, a palha de soja pode ser usada para gerar produtos de alto valor agregado por meio da conversão termoquímica.

De acordo com Forster-Carneiro et al. (2013), cada tonelada de soja resulta em 2,05 toneladas de folhas e pontas, considerando-se um teor de umidade de 15%–20% e uma perda de resíduos de 75% que permanecem no campo. Carvalho et al. (2019) relatam que cada tonelada de soja resulta em 2,01 toneladas de palha de soja com uma DR de 100%. A EPE também fornece informações sobre o fator para estimativa da palha de soja no SI Energy. Esse modelo para cálculo do potencial energético de resíduos agrícolas pressupõe que 1,68 tonelada de palha resulta de cada tonelada de soja, com uma DR de 30% (EPE, 2021).

Tabela 15: Fatores para a geração de palha de soja

Fator (ton)	DR	Fonte
2,05	100%	Forster-Carneiro et al. (2013)
2,01	100%	Carvalho et al. (2019)
1,68	30%	EPE (2021)

Neste estudo, calculamos a média desses fatores, considerando a DR, para o fator de conversão. Isso resultou em um fator de 1,52 tonelada de palha de soja para cada tonelada de soja colhida.

3.4.4.2.2. Produção de soja e biodiesel

Conforme mostrado na Figura 22, após a colheita, a soja limpa entra no processo de extração de óleo. Essa extração é feita em prensa mecânica ou por solvente e resulta em óleo vegetal e farelo de soja ou palha e torta de sementes. As tortas de sementes prensadas são compostas principalmente de celulose, hemicelulose e lignina, sendo usadas, em geral, para alimentação de gado. Segundo a literatura, no processo de extração, cerca de 35% das sementes são convertidas em óleo vegetal e os demais 65% permanecerão como torta de sementes e farelo de soja (Santibáñez & Varnero, 2014). Segundo Santibáñez e Varnero (2014) e Thiagarajan et al. (2018), cada tonelada de soja produz 0,8 tonelada de torta dependendo da qualidade da semente. O óleo vegetal extraído varia de matéria-prima para matéria-prima e é o principal insumo da produção de biodiesel. Ambos os produtos podem ser convertidos termoquimicamente em gás de síntese; porém, como apenas resíduos ou subprodutos de baixo valor são considerados neste estudo, esta não será uma opção.

O biodiesel é uma mistura de ésteres alquílicos de ácidos graxos obtidos de lipídios naturais, como óleo vegetal e/ou gordura animal, por meio de processos industriais de transesterificação ou reação de esterificação utilizando álcool (metanol ou etanol) na presença de um catalisador (Mata & Martins, 2010; Nda-Umar et al., 2019; Plácido & Capareda, 2016; Vasudevan & Fu, 2010). O biodiesel é produzido a partir de uma variedade de matérias-primas lipídicas que geralmente são específicas do clima regional e da localização geográfica (Bala-Litwiniak Radomiak, 2018; Mata & Martins, 2010). Algumas das matérias-primas comumente usadas para a produção de biodiesel são soja, semente de algodão, óleo de palma, colza, Jatropha, girassol, gordura animal (frango, bovino e suíno) e óleos residuais (Plácido & Capareda, 2016; Vasudevan & Fu, 2010). No Brasil, o óleo vegetal de soja é a principal matéria-prima utilizada na produção de biodiesel. A Tabela 16 mostra as matérias-primas e suas participações na produção nacional de biodiesel.

Tabela 16: Participação das matérias-primas na produção de biodiesel no Brasil em 2018. Fonte: adaptado de ANP (2019)

Matéria-prima	Participação na produção de biodiesel
Óleo de soja	70%
Gordura bovina	13,24%
Gordura suína	2,14%
Óleo de palma	1,33%
Óleo de semente de algodão	0,86%
Outras*	12,43%

*Inclui óleo de milho, óleo de canola, óleo de cozinha, frango e outras gorduras.

Nos últimos anos, houve um aumento significativo na produção mundial de biodiesel (Bala-Litwiniak & Radomiak, 2018; Plácido & Capareda, 2016). Os cinco maiores produtores mundiais em 2018, em ordem decrescente, foram Estados Unidos, Brasil, Indonésia, Alemanha e Argentina (REN21, 2019). A produção de biodiesel está crescendo no Brasil desde que o governo federal implementou o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), em 2004 (Quispe et al., 2013). Desde 1º de janeiro de 2008, o biodiesel é misturado obrigatoriamente ao diesel de petróleo e faz parte da matriz energética nacional (Leoneti et al., 2012). Em setembro de 2019, uma resolução permitiu o uso de misturas de biodiesel de até 15%, com um percentual mínimo de 11%. A produção de biodiesel em 2018 foi de 5,35 bilhões de litros, um aumento de 25% em relação a 2017 (ANP, 2019). Como a mistura de biodiesel é obrigatória no Brasil, a taxa média de crescimento anual da produção de biodiesel foi de 16,44% de 2008 a 2018.

Conforme explicado, o processo de produção de biodiesel no Brasil é baseado na reação alcalina de transesterificação entre óleo vegetal ou gordura animal e metanol na presença de um catalisador (Leoneti et al., 2012). Na Figura 23, é dada a reação geral de transesterificação dos triglicerídeos. Nessa reação, 1 mol de triglicerídeo reage com 3 moles de metanol para produzir 3 moles de éster metílico e 1 mol de glicerol. Embora a razão molar estequiométrica teórica de álcool/óleo seja de 3:1, a quantidade de álcool adequada pode variar conforme o catalisador e caso a caso. Em Vasudevan e Fu (2010) e Mata e Martins (2010), é mostrado que a reação de transesterificação do óleo de soja com metanol e diferentes catalisadores tem um rendimento de biodiesel em torno de 0,95.

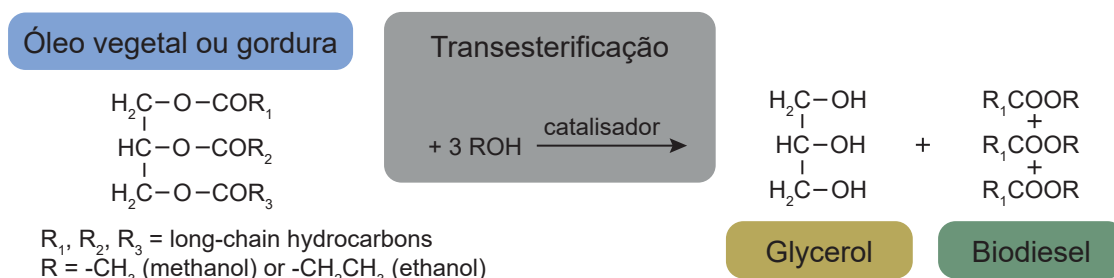


Figura 23: Reação de transesterificação de triglicerídeos em biodiesel e glicerol. Fonte: adaptado de Leoneti et al. (2012)

1,2,3-propanotriol, comumente denominado glicerol (ou glicerina), é um dos principais subprodutos da reação de transesterificação e desperta muito interesse devido ao seu potencial de gerar grandes receitas para essa indústria (Plácido & Capareda, 2016). O glicerol advindo da produção de biodiesel, também denominado glicerol bruto, é considerado um produto bruto não refinado (Leoneti et al., 2012; Plácido & Capareda, 2016). De acordo com diversos trabalhos da literatura, a produção de biodiesel gera aproximadamente 10% de glicerol bruto em volume. O glicerol bruto é então separado do biodiesel em um tanque (Mata & Martins, 2010).

A produção e a qualidade do glicerol bruto variam nas diferentes plantas de biodiesel. A composição do glicerol bruto depende do tipo de catalisador, da matéria-prima utilizada, da eficiência do processo e da recuperação do metanol (Nda-Umar et al., 2019). Geralmente, é composto de glicerol puro ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$), metanol (CH_3OH), umidade, ésteres metílicos de ácidos graxos, cinzas, sabão e resquícios de sal catalisador. O teor de glicerol no glicerol bruto varia de acordo com a matéria-prima. Na Tabela 17, é mostrado o teor de glicerol do óleo de soja, principal matéria-prima no Brasil, para diferentes plantas de produção de biodiesel.

Tabela 17: Teor de glicerol do óleo de soja em diferentes plantas de produção de biodiesel. Fonte: Nda-Umar et al. (2019) and Quispe et al. (2013)

Matéria-prima	Teor de glicerol
Glicerol puro comercial	99,5%
Óleo de soja	67,8%
Óleo de soja 1	63,0%
Óleo de soja 2	22,9%
Óleo de soja 3	33,3%
Óleo de cozinha usado	83,4%

O glicerol bruto produzido tem baixa qualidade e baixo valor comercial, e muitas vezes sua purificação é considerada muito cara para a indústria de biodiesel (Leoneti et al., 2012; Nda-Umar et al., 2019; Plácido & Capareda, 2016). Devido a isso, grande atenção tem sido dada à utilização de glicerol bruto para criar produtos de maior valor. Um deles é o gás de síntese, que pode ser derivado diretamente do glicerol bruto por meio de conversão termoquímica (Nda-Umar et al., 2019; Plácido & Capareda, 2016).

Após a separação do glicerol bruto, as impurezas devem ser removidas em um processo de lavagem para que o biodiesel atenda aos padrões de produção. As impurezas restantes consistem em óleo, metanol, catalisador residual, sabão e glicerol. Antes da etapa de lavagem, o metanol é normalmente recuperado por técnicas de destilação até 85% e reciclado de volta para o processo de transesterificação (Plácido & Capareda, 2016). Os efluentes do processo de lavagem do biodiesel são considerados o maior resíduo e devem ser tratados de forma eficiente antes de ser lançados no meio ambiente (Plácido & Capareda, 2016). Não há literatura sobre sua possível conversão em gás de síntese. A remoção das impurezas gera entre 20 e 120 litros de efluentes para cada 100 litros de biodiesel produzidos (Plácido & Capareda, 2016).

O crescimento da produção de biodiesel no Brasil tem levado a um aumento paralelo de subprodutos e resíduos, o que levanta preocupações econômicas e ambientais. À luz do conceito de biorrefinarias, a transformação desses subprodutos e resíduos em produtos de maior valor, como o gás de síntese, poderia expandir a capacidade produtiva da indústria de biodiesel. Com a identificação e seleção dos subprodutos e resíduos mais adequados do processo de biodiesel, pode-se determinar o potencial de produção de gás de síntese.

3.4.5. Indústria de milho

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de milho, depois dos Estados Unidos e da China. O longo período de cultivo no país permite a cultura de milho em todas as regiões do Brasil, com duas safras por ano (Associação Brasileira da Indústria do Arroz – Abiarroz, 2021). O milho é um dos grãos mais importantes do Brasil. Em 2018, foram colhidas cerca de 81 milhões de toneladas de milho, principalmente para a alimentação do gado doméstico (IBGE, 2019). Desde 2015, houve um aumento no uso do milho como matéria-prima para a produção de etanol no Brasil (Barros & Flake, 2019). Em 2018, a participação do milho nessa produção foi de 0,5%. Na Figura 24, é mostrado um esquema simplificado da indústria do milho e o possível processo interligado de produção industrial do etanol.

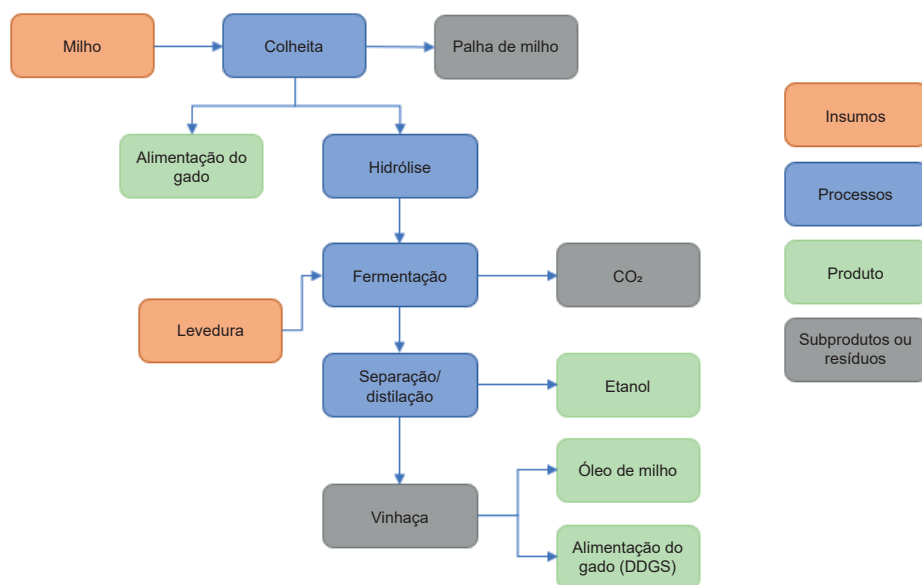


Figura 24: Esquema simplificado da indústria do milho com seus subprodutos e resíduos adequados. Fonte: adaptado de Fritsche et al. (2016)

Além dos principais processos, a Figura 24 mostra os principais insumos e produtos, bem como os subprodutos e resíduos da indústria do milho. Os resíduos mais significativos dessa indústria são os da colheita. Tais resíduos agrícolas, ou restolhos, incluem caule, palha, cascas e espigas de milho (Forster-Carneiro et al., 2013). O uso do milho na produção de etanol resulta em torta de filtro e efluentes do processo de destilação, também conhecidos como vinhaça. Após a centrifugação, a vinhaça produz óleo de milho e grãos secos de destilaria com solúveis (DDGS, na sigla em inglês), que são usados principalmente para alimentação animal. Durante o processo de fermentação, é emitido CO₂ relativamente puro. Todos esses subprodutos e resíduos podem ser usados para gerar produtos de alto valor agregado, como o gás de síntese. Devido à participação do milho na produção brasileira de etanol, apenas os resíduos agrícolas da colheita serão aprofundados neste estudo.

De acordo com Forster-Carneiro et al. (2013), cada tonelada de milho resulta em 1,46 tonelada de resíduos, considerando-se um teor de umidade de 25%–30% e uma perda de resíduos de 70% que permanecem no campo. Carvalho et al. (2019) relatam que cada tonelada de milho resulta em 1,53 tonelada de palha de milho com 100% de DR. A EPE também fornece informações sobre o fator de estimativa da palha de milho no SI Energy. Esse modelo para calcular o potencial energético de resíduos agrícolas (EPE, 2021) pressupõe que 1,98 tonelada de palha resulta de cada tonelada de milho com uma DR de 40%.

Tabela 18: Fatores para a geração de palha de milho

Fator (ton)	DR	Fonte
1,46	100%	Forster-Carneiro et al. (2013)
1,53	100%	Carvalho et al. (2019)
1,98	40%	EPE (2021)

Neste estudo, calculamos a média desses fatores, considerando a DR, para o fator de conversão. Isso resultou em um fator de 1,25 tonelada de palha de milho para cada tonelada de milho colhida.

3.4.6. Indústria de arroz

Depois de alguns países asiáticos, o Brasil é o maior produtor e consumidor de arroz. Em 2018, cerca de 12 milhões de toneladas de arroz não beneficiado foram colhidas no Brasil. Embora o país exporte parte de sua produção, a maior parte do arroz colhido é destinado ao consumo interno (Abiarroz, 2021). A colheita do arroz gera resíduos agrícolas como casca e palha de arroz, que possuem alto percentual de matéria orgânica e são adequados para a geração de produtos de valor agregado.

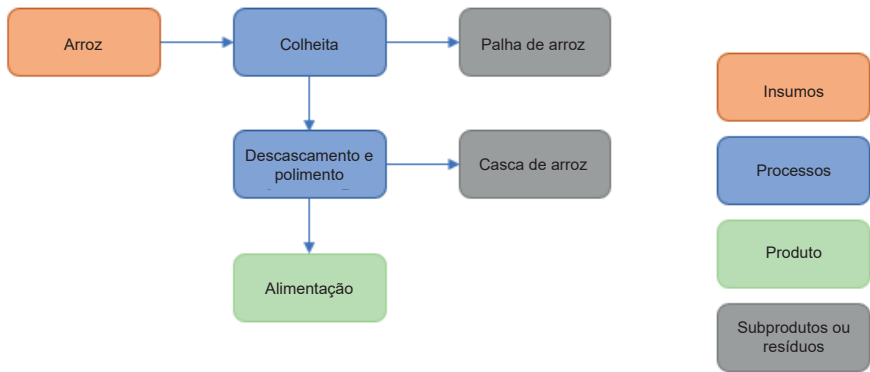


Figura 25: Esquema simplificado da indústria do arroz com seus subprodutos e resíduos adequados. Fonte: elaboração própria

De acordo com Forster-Carneiro et al. (2013), cada tonelada de arroz resulta em 1,49 tonelada de resíduos, considerando-se um teor de umidade de 18%–23% e uma perda de resíduos de 75% que permanecem no campo. Carvalho et al. (2019) relatam que cada tonelada de arroz resulta em 1,54 tonelada de palha de arroz com 100% de DR e 0,26 tonelada de casca de arroz com disponibilidade de 30%. Cada tonelada de arroz colhida resulta em 1,24 tonelada de resíduos agrícolas, com uma DR de 100%. A EPE também fornece informações sobre o fator de estimativa dos resíduos de arroz no SI Energy. Esse modelo para calcular o potencial energético de resíduos agrícolas pressupõe que 1,5 tonelada de resíduos agrícolas resulta de cada tonelada de arroz com uma DR de 40% (EPE, 2021).

Tabela 19: Fatores para a geração de palha e casca de arroz

Fator (ton)	DR	Fonte
1,49	100%	Forster-Carneiro et al. (2013)
1,24	100%	Carvalho et al. (2019)
1,50	40%	EPE (2021)

Neste estudo, calculamos a média desses fatores, considerando a DR, para o fator de conversão. Isso resultou em um fator de 1,24 tonelada de resíduos agrícolas para cada tonelada de arroz colhida.



4.1.1. Estimativa de subprodutos e resíduos

Para estimar a quantidade de CO₂ emitido pela indústria brasileira de cimento, foram retirados dados do SNIC (2018), que atualiza anualmente as informações sobre a produção regional de cimento. O fator de emissão foi recuperado do *Roadmap tecnológico do cimento* (Visedo & Pecchio, 2019) e consiste em 0,55 tonelada de CO₂ por tonelada de cimento produzido, considerando apenas as emissões diretas em plantas integradas. A Tabela 20 mostra a distribuição regional da produção de cimento e as emissões de CO₂ estimadas em 2018.

Tabela 20: Produção de cimento e emissões de CO₂ estimadas por região e estado. Fonte: SNIC (2018) e elaboração própria

Região e estado	Produção de cimento (milhões de toneladas)	Emissão de CO ₂ (milhões de toneladas)
Norte	2,49	1,37
Rondônia	(0,22)*	-
Acre	-	-
Amazonas	0,51*	0,28
Roraima	-	-
Pará	0,89	0,49
Amapá	-	-
Tocantins	0,68	0,37
Ajustes	0,41	0,23
Nordeste	10,85	5,967
Maranhão	0,32	0,17
Piauí	-	-
Ceará	2,22	1,22
Rio Grande do Norte	0,81	0,45
Paraíba	2,32	1,27
Pernambuco	20	0-11
Alagoas	0,047	0,26
Sergipe	1,86	1,03
Bahia	1,01	0,55
Ajustes	2,06	1,13
Sudeste	25,37	13,95
Minas Gerais	12,74	7,00
Espírito Santo	0,75	0,41
Rio de Janeiro	2,34	1,28
São Paulo	5,16	2,84
Ajustes	4,38	2,41
Sul	8,81	4,85
Paraná	6,06	3,36
Santa Catarina	1,36	0,75
Rio Grande do Sul	1,31	0,73
Ajustes	0,060	0,033

Centro-Oeste	6,04	3,32
Mato Grosso do Sul	0,62	0,34
Mato Grosso	1,18	0,65
Goiás	1,72	0,94
Distrito Federal	2,53	1,39
Brasil	53,55	29,45

*Considerando que a produção de clínquer de Rondônia ocorre no estado do Amazonas.

Os dados publicados pelo SNIC incluem estimativas de plantas integradas não associadas e misturadores que serão considerados apenas em nível regional. Os dados não fazem distinção entre cimento produzido em plantas integradas e plantas de moagem e mistura, que não produzem clínquer. Em relação à distribuição das plantas no Brasil (ver Figura 26), Rondônia é o único estado que possui apenas planta de moagem e não produz clínquer. Nesse caso, presume-se que o clínquer seja transportado do estado mais próximo da região, o Amazonas. Para todas as outras plantas de moagem e mistura, considera-se que o clínquer é produzido no mesmo estado.

A região Sudeste lidera com folga a produção de cimento no Brasil (e consequentemente as emissões de CO₂), com uma participação de 47%, seguida do Nordeste, com 20%. A comparação das emissões totais de CO₂ com os dados atualizados anualmente do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) mostra uma diferença de 1,9 MtCO₂ nas emissões estimadas (SEEG, 2018).

4.1.2. Produção de gás de síntese

A partir da estimativa das emissões regionais de CO₂ pelo processo industrial, a produção potencial de gás de síntese foi determinada por meio de um processo de conversão indireta, a eletrólise co-SOEC. As emissões de CO₂ no processo de produção de cimento de ambos os fluxos são combinadas no gás de combustão. Para ser usado, o CO₂ emitido deve ser separado e limpo por uma tecnologia de captura de carbono (ver Capítulo 2). A aplicação da tecnologia de pós-combustão tem despertado atenção e é potencialmente adequada para fábricas de cimento antigas e mais novas (IEAGHG, 2017).

De acordo com Oliveira et al. (2016), que avaliaram o potencial de captura de carbono no setor cimenteiro brasileiro, a única tecnologia de captura disponível comercialmente para as fábricas do país é baseada na rota de captura pós-combustão, por absorção química. Portanto, neste estudo, foi considerada uma tecnologia de pós-combustão para capturar o CO₂ das fábricas de cimento para a produção de gás de síntese.

Essa tecnologia, que tem uma eficiência de captura de 90%, foi descrita no Capítulo 2. Com o fator de conversão da eletrólise co-SOEC considerado neste estudo (ver Capítulo 2), determinou-se a produção potencial de gás de síntese por região e estado. De acordo com esse processo, cada kg de CO₂ resulta em 0,84 kg de gás de síntese.

Tabela 21: Produção de gás de síntese da indústria de cimento por região e estado. Fonte: elaboração própria

Região e estado	Emissão de CO ₂ após a captura (milhões de toneladas)	Produção potencial de gás de síntese (milhões de toneladas)
Norte	1,23	1,03
Rondônia	-	-
Acre	-	-
Amazonas	0,25	0,21
Roraima	-	-
Pará	0,44	0,37
Amapá	-	-
Tocantins	0,33	0,28
Ajustes	20,0	0,17
Nordeste	5,37	4,51
Maranhão	0,16	0,13
Piauí	-	-
Ceará	1,10	0,92
Rio Grande do Norte	0,40	0,34
Paraíba	1,15	0,96
Pernambuco	0,010	0,0084
Alagoas	0,023	0,019
Sergipe	0,93	0,78
Bahia	0,50	0,42
Ajustes	1,02	0,86
Sudeste	12,56	10,55
Minas Gerais	6,31	5,29
Espírito Santo	0,37	0,31
Rio de Janeiro	1,16	0,97
São Paulo	2,55	2,14
Ajustes	2,17	1,82
Sul	4,36	3,66
Paraná	3,01	2,52
Santa Catarina	0,68	0,57
Rio Grande do Sul	0,65	0,55
Ajustes	0,029	0,025
Centro-Oeste	2,99	2,51
Mato Grosso do Sul	0,31	0,26
Mato Grosso	0,58	0,49
Goiás	0,85	0,71
Distrito Federal	1,25	1,05
Brasil	26,51	22,27

Os resultados foram mapeados por região e estado no QGIS. A produção potencial de gás de síntese por região e estado é mostrada nas Figuras 27 e 28, respectivamente. As regiões e os estados estão divididos por cor segundo seu potencial para produzir gás de síntese. Cores mais escuras correspondem a uma produção maior. A subdivisão por estados com localização das

plantas permite uma melhor análise do potencial de produção de gás de síntese. Como não havia informações disponíveis sobre a produção de cada unidade, seu processo produtivo e sua localização, as plantas integradas no Brasil foram localizadas com base nas informações fornecidas por Visado e Pecchio (2019), SNIC (2013) e Google Maps.

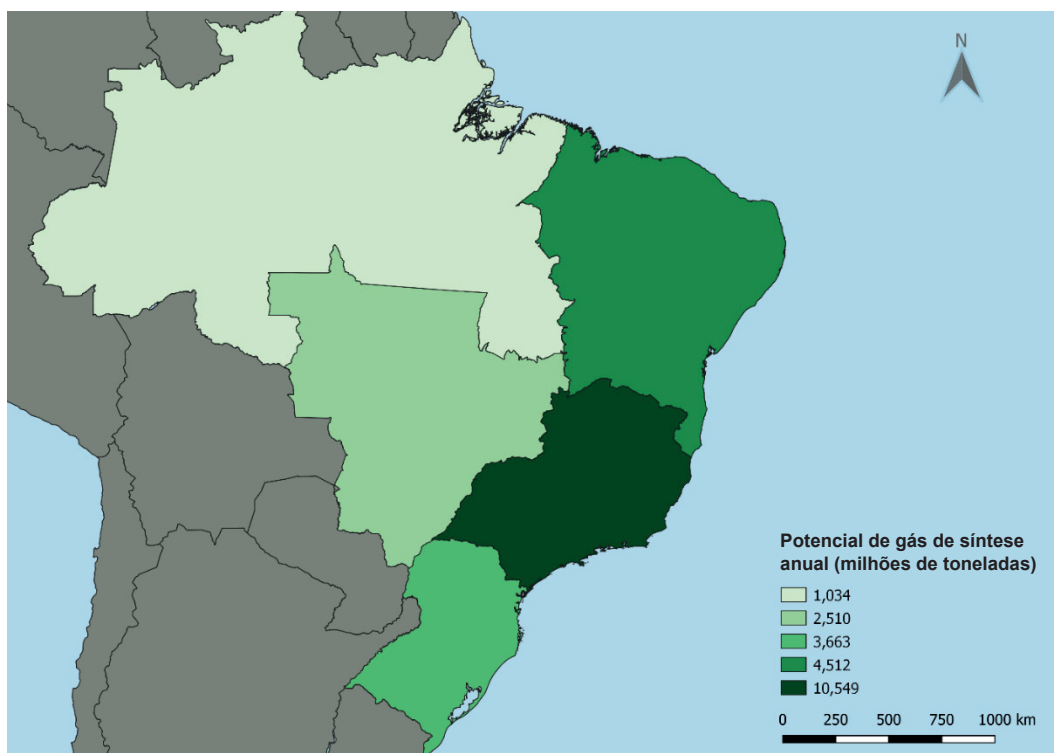


Figura 27: Potencial da indústria de cimento para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria

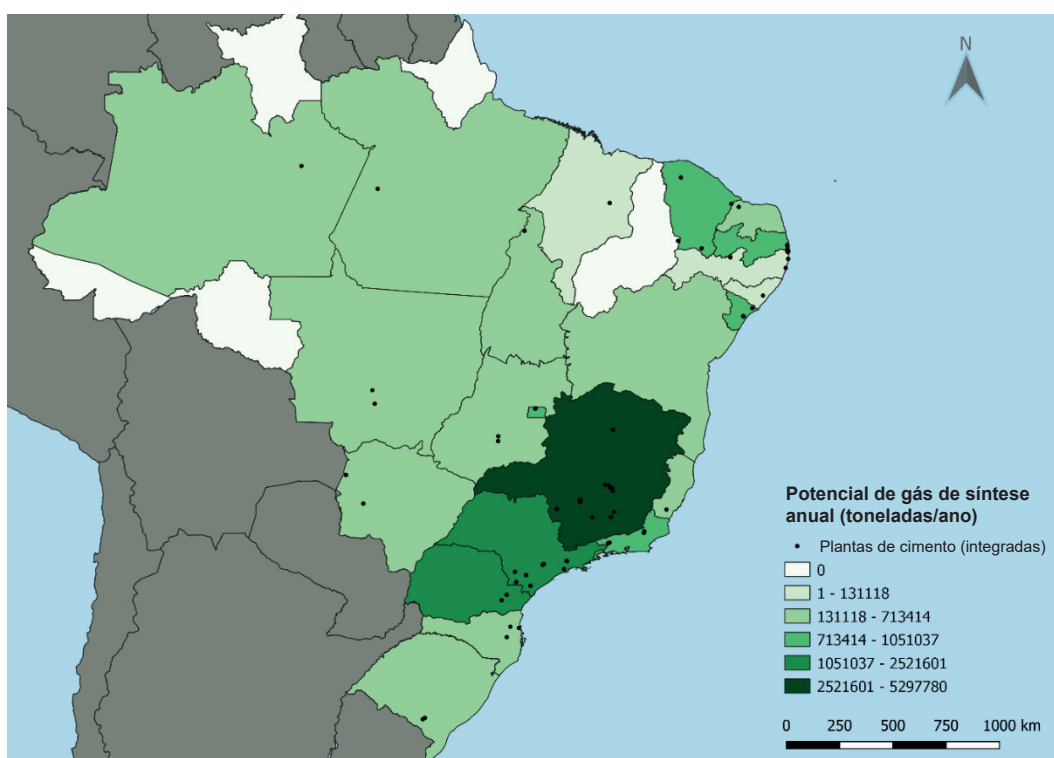


Figura 28: Potencial da indústria de cimento para produzir gás de síntese por estado e por distribuição de plantas integradas. Fonte: elaboração própria

A região Sudeste do Brasil tem o maior potencial de geração de gás de síntese, seguida pela região Nordeste. O estado de Minas Gerais, nessa região, apresenta o maior potencial, com 23% da produção total de gás de síntese, seguido pelos estados do Paraná, no Sul, e São Paulo, no Sudeste, com 11% e 9,6%, respectivamente.

4.2. Indústria siderúrgica

No Capítulo 3, identificamos os subprodutos e resíduos da indústria siderúrgica brasileira. Os resíduos sólidos dessa indústria são largamente reaproveitados, não havendo literatura específica sobre seu uso na produção de gás de síntese. Portanto, apenas a emissão de CO₂ é considerada adequada para essa produção.

Na Figura 29, são apresentadas as 32 plantas de produção de aço no Brasil. Destas, 17 são integradas e 15 são semi-integradas (IAB, 2019). A indústria do aço está representada em 11 estados, com grande concentração na região Sudeste.

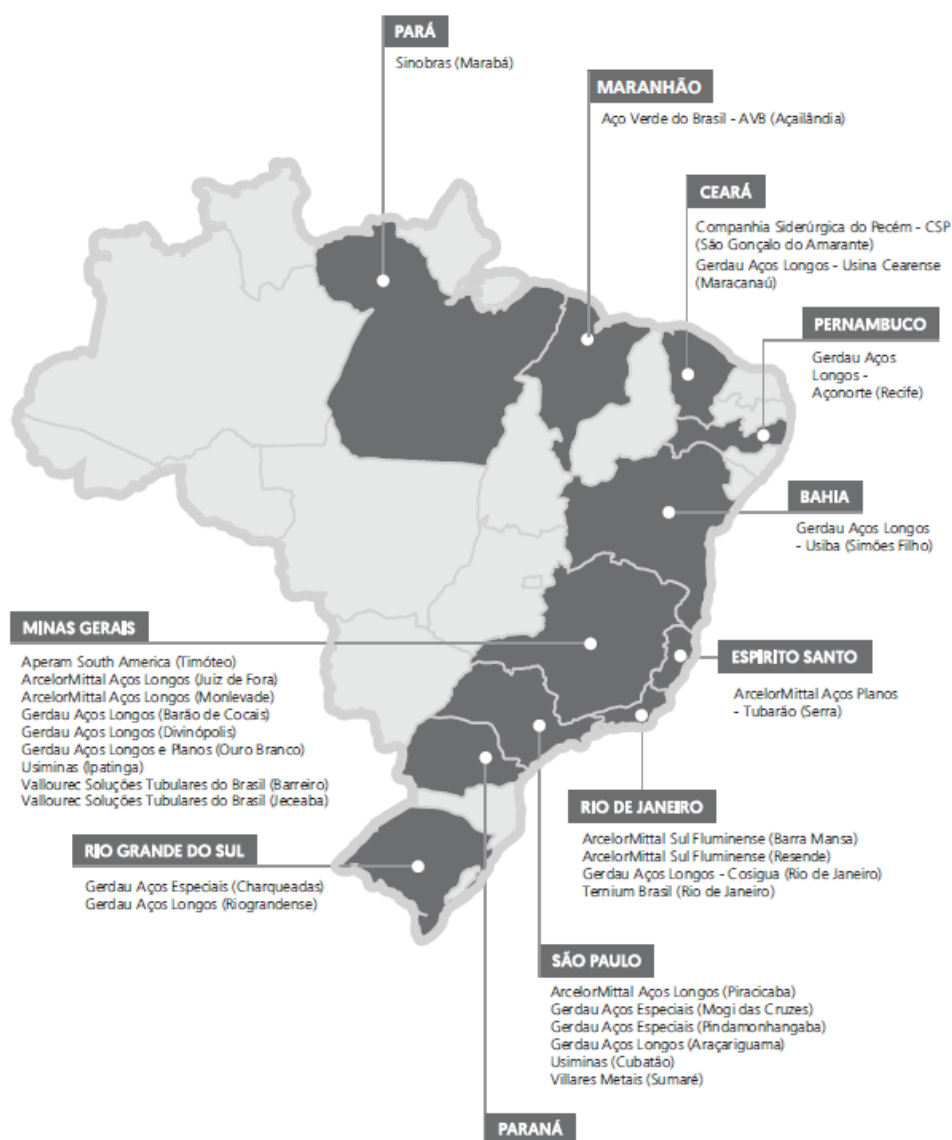


Figura 29: Distribuição da indústria siderúrgica brasileira. Fonte: IABr (2019)

4.2.1. Estimativa de subprodutos e resíduos

Para estimar a quantidade de CO₂ emitida pela indústria siderúrgica brasileira, foram usados dados do *Anuário estatístico 2019* do IABr (2019). O fator de emissão calculado pelo IABr em 2016 com a metodologia do IPCC é de 1,9 tonelada de CO₂ por tonelada de aço bruto produzida em todo o processo (CNI, 2017). Não há informações sobre o processo siderúrgico utilizado por região e estado; por isso, o cálculo de CO₂ foi feito considerando 76,5% da produção regional de aço bruto, o que representa a parcela da rota das usinas integradas.

As emissões de CO₂ foram calculadas uma vez considerando apenas o fator de emissão do alto-forno, que representa a fonte mais significativa de CO₂ (1,56 tonelada por tonelada de aço bruto), e outra vez considerando as emissões durante todo o processo. A Tabela 22 exibe a distribuição regional da produção de aço bruto e as emissões estimadas de CO₂ em 2018.

Tabela 22: Produção brasileira de aço bruto e emissões estimadas de CO₂ por região e estado. Fonte: IABr (2019) e elaboração própria

Região e estado	Produção total de aço bruto (milhões de toneladas)	Produção de aço bruto pela rota integrada (milhões de toneladas)	Emissões de CO ₂ pelo alto-forno* (milhões de toneladas)	Emissões de CO ₂ pela rota planta integrada** (milhões de toneladas)
Norte	0,34	0,26	0,41	0,5
Pará	0,34	0,26	0,41	0,5
Nordeste	3,60	2,75	4,29	5,23
Maranhão	0,28	0,21	0,33	0,41
Ceará	3,09	2,36	3,69	4,48
Pernambuco	0,23	0,17	0,27	0,33
Sudeste	30,68	23,47	36,62	44,60
Minas Gerais	10,60	8,10	12,64	15,39
Espírito Santo	7,30	5,59	8,71	10,61
Rio de Janeiro	10,41	7,96	12,42	15,12
São Paulo	2,38	1,82	2,84	3,46
Sul	0,78	0,59	0,93	1,13
Rio Grande do Sul	0,78	0,59	0,93	1,13
Centro-Oeste	0	0	0	0
Brasil	35,41	27,09	42,25	51,46

*1,56 tonelada de CO₂ por tonelada de aço bruto. ** 1,9 tonelada de CO₂ por tonelada de aço bruto (com base no IABr em 2016 com a metodologia IPCC)

A região Sudeste lidera com folga a produção de aço no Brasil (e as emissões de CO₂), com uma participação de 86%, seguida pelo Nordeste. Uma comparação das emissões de CO₂ com as emissões absolutas de CO₂ calculadas pelo IABr em 2016 (CNI, 2017) mostra uma diferença de 6,5 MtCO₂, que pode ser devida à consideração apenas da rota integrada, desprezando a rota semi-integrada.

4.2.2. Produção de gás de síntese

A partir da estimativa das emissões regionais de CO₂ pelo processo industrial, a produção potencial de gás de síntese foi determinada por meio de um processo de conversão indireta, a eletrólise co-SOEC. Para ser usado, o CO₂ emitido deve ser capturado por uma tecnologia de captura de carbono. O CO₂ gerado durante o processo de fabricação de ferro no alto-forno é responsável por 82% das emissões de todo o processo produtivo, e sua concentração no gás de combustão varia entre 27% e 28% segundo Patricio et al. (2017), IEAGHG (2017) e IPCC (2005). As emissões do alto-forno podem ser capturadas tanto na pré-combustão quanto na pós-combustão. Nenhuma das abordagens captura todo o CO₂ da planta integrada, uma vez que grandes volumes de CO₂ também são emitidos nos processos não essenciais, como os da planta de sinterização, do forno de coque e do BOF (IEAGHG, 2017).

Portanto, neste estudo, o potencial de produção de gás de síntese foi calculado considerando apenas as emissões de CO₂ durante o processo de alto-forno. A tecnologia de captura de carbono pós-combustão é considerada a opção mais madura na indústria do aço (Cormos, 2016). Por isso, neste estudo, foi considerada uma tecnologia de pós-combustão para capturar o CO₂ para a produção de gás de síntese. Essa tecnologia, que possui uma eficiência de captura de 90%, foi descrita no Capítulo 2. Com o fator de conversão da eletrólise co-SOEC considerado neste estudo (ver Capítulo 2), determinou-se a produção potencial de gás de síntese por região e estado. De acordo com esse processo, cada kg de CO₂ resulta em 0,84 kg de gás de síntese.

Tabela 23: Produção de gás de síntese da indústria siderúrgica por região e estado. Fonte: elaboração própria

Região e estado	Emissão de CO ₂ pós-captura pelo alto-forno (milhões de toneladas)	Produção potencial de gás de síntese por alto-forno (milhões de toneladas)
Norte	0,37	0,31
Pará	0,37	0,31
Nordeste	3,86	3,25
Maranhão	0,3	0,25
Ceará	3,32	2,79
Pernambuco	0,25	0,21
Sudeste	32,96	27,69
Minas Gerais	11,38	9,56
Espírito Santo	7,84	6,60
Rio de Janeiro	11,18	9,39
São Paulo	2,56	2,15
Sul	0,84	0,70
Rio Grande do Sul	0,84	0,70
Centro-Oeste	0	0
Brasil	38,03	31,94

Os resultados foram mapeados por região e estado no QGIS. As Figuras 30 e 31 exibem a produção potencial de gás de síntese por região e estado. A subdivisão por estados com localização das plantas permite uma melhor análise do potencial de produção de gás de síntese. Como não havia informações disponíveis sobre a produção de cada unidade, seu processo produtivo e sua localização, as plantas siderúrgicas no Brasil foram localizadas com base nas informações do IABr (2019) e do Google Maps. Embora 27 das 32 unidades de produção de aço tenham sido localizadas, não foi possível distingui-las entre integradas e semi-integradas.

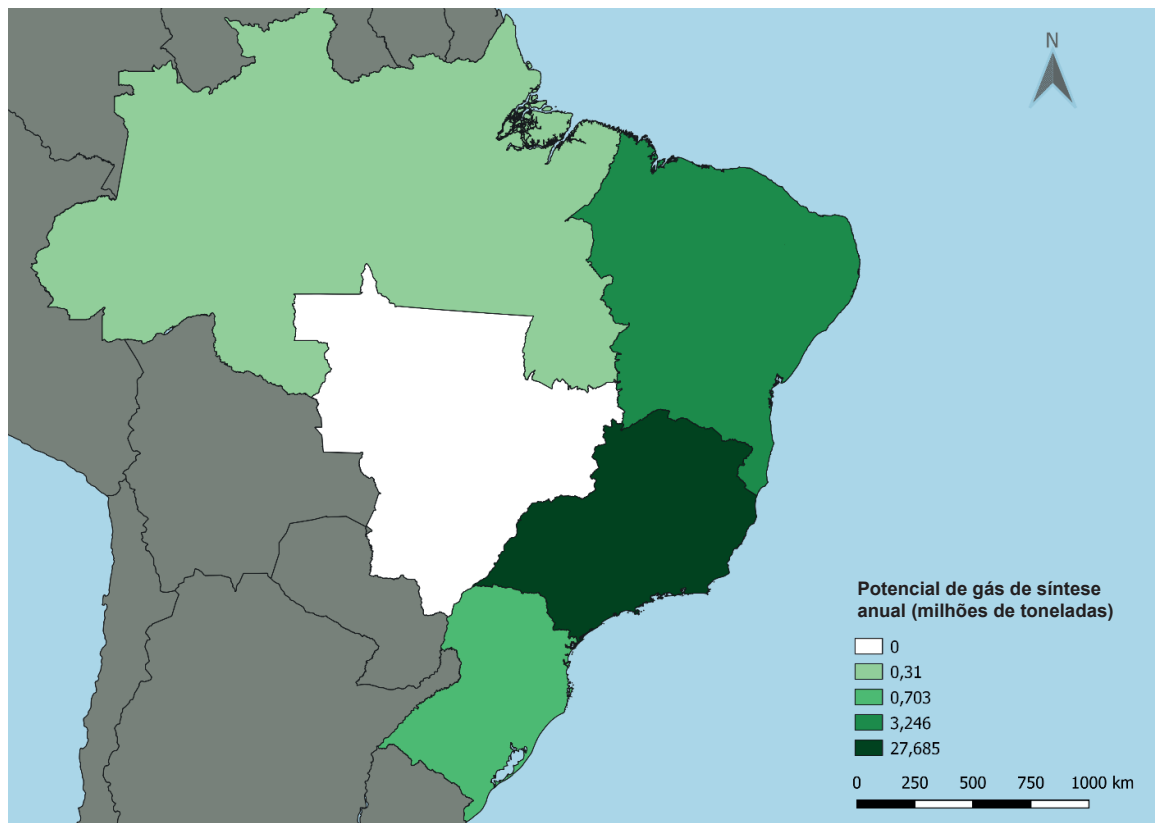


Figura 30: Potencial da indústria siderúrgica para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria

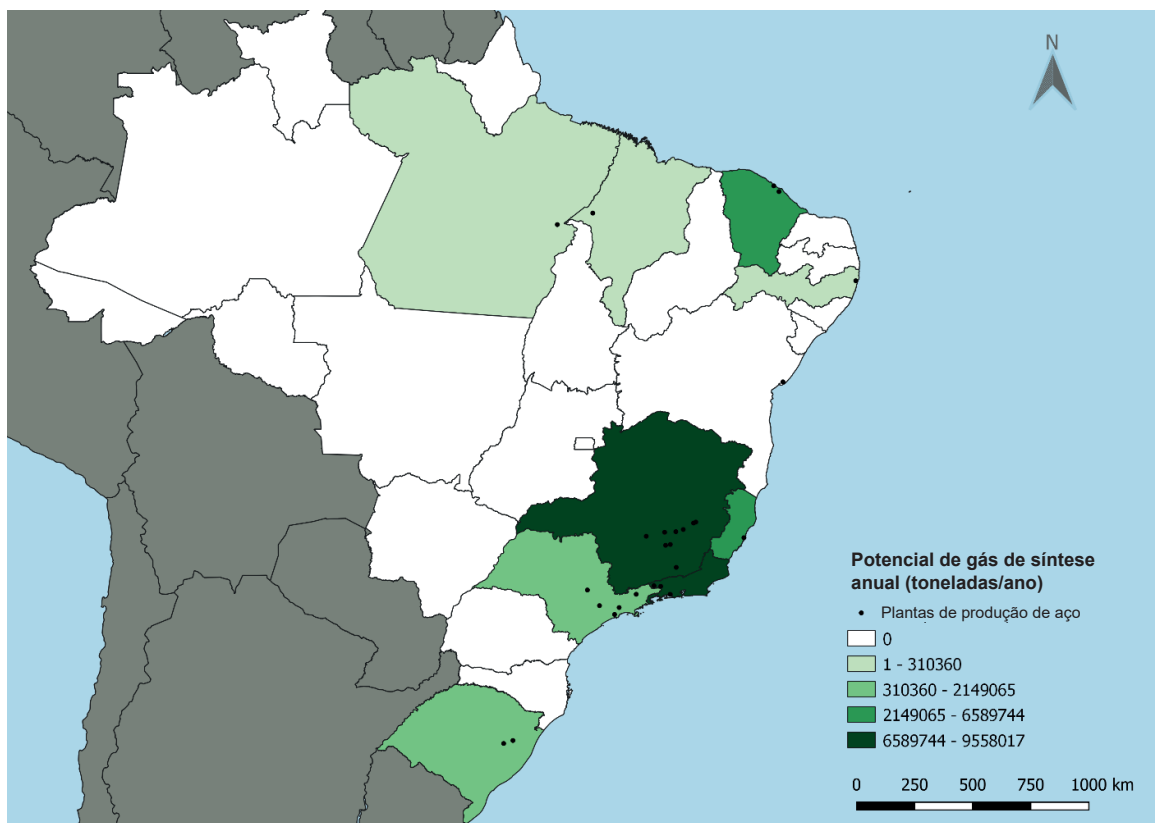


Figura 31: Potencial da indústria siderúrgica para produzir gás de síntese por estado e distribuição de plantas. Fonte: elaboração própria

A região Sudeste do Brasil tem o maior potencial, com 86% da produção total de gás de síntese. Os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, na região Sudeste, respondem respectivamente por 30% e 29% da produção total de gás de síntese, seguidos pelo Espírito Santo, com 20%.

4.3. Indústria da cana-de-açúcar

No Capítulo 3, foram identificadas as agroindústrias e seus subprodutos e resíduos adequados para a produção de gás de síntese. A indústria da cana-de-açúcar, interligada com a indústria do bioetanol, é uma delas. Os resíduos adequados dessa indústria são a palha e o bagaço da cana-de-açúcar e as emissões de CO₂ da indústria do bioetanol. A seguir, são estimados e mapeados os subprodutos e resíduos adequados e seu potencial para produzir gás de síntese.

4.3.1. Resíduos agrícolas

4.3.1.1. Estimativa de resíduos

Para estimar os resíduos agrícolas da indústria de cana-de-açúcar no Brasil, os dados da produção anual por região e estado em 2018 foram obtidos do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA), publicado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019). Como explicado no Capítulo 3, cada tonelada de cana-de-açúcar resulta em 0,14 tonelada de palha. O resíduo estimado por região e estado é mostrado na Tabela 24.

4.3.1.2. Produção de gás de síntese

Com base na estimativa da produção de palha de cana-de-açúcar em 2018, foi determinado o potencial de produção de gás de síntese por meio de um processo de conversão direta. Para tanto, considerou-se a gaseificação de leito fluidizado da palha da cana-de-açúcar, conforme apresentado no Capítulo 2. A quantidade de gás de síntese produzida pela gaseificação de 1 kg de palha foi estimada com a equação geral 4 (ver Capítulo 2).

$$\eta_{FB} = \frac{LHV_{Gás\ de\ síntese} * X_{kg\ Gás\ de\ síntese}}{LHV_{Palha\ de\ cana-de-açúcar} * X_{kg\ Palha\ de\ cana-de-açúcar}} \quad (8)$$

O fator de conversão para o resíduo agrícola foi determinado seguindo essa equação e informações da Tabela 5 e da Tabela 2 do Anexo, que resumem os LHV dos subprodutos e resíduos. A gaseificação de leito fluidizado de 1 kg de palha de cana resulta em 1,55 kg de gás de síntese. Com a gaseificação de fluxo arrastado, 1 kg de palha de cana gera 1,23 kg de gás de síntese. A Tabela 24 mostra a produção de gás de síntese por região e estado por meio da gaseificação de leito fluidizado.

Tabela 24: Estimativa de resíduos agrícolas e produção potencial de gás de síntese da indústria de cana-de-açúcar por região e estado. Fonte: IBGE (2019) e elaboração própria

Região e estado	Produção de cana-de-açúcar em 2018 (milhões de toneladas)	Produção de resíduos de cana-de-açúcar em 2018 (milhões de toneladas)	Produção potencial de gás de síntese a partir da palha de cana-de-açúcar (milhões de toneladas)
Norte	4,33	0,61	0,94
Rondônia	0,015	0,0021	0,0032
Acre	0,011	0,0016	0,0025
Amazonas	0,26	0,37	0,57
Roraima	3,976	0,0005	0,0009
Pará	0,93	0,13	0,20
Amapá	0,004	0,0006	0,0009
Tocantins	3,10	0,43	0,67
Nordeste	49,15	6,88	10,66
Maranhão	2,43	0,34	0,53
Piauí	0,84	0,12	0,18
Ceará	0,57	0,08	0,12
Rio Grande do Norte	3,86	0,54	0,84
Paraíba	5,54	0,78	1,20
Pernambuco	11,96	1,67	2,59
Alagoas	17,24	2,41	3,74
Sergipe	2,05	0,29	0,44
Bahia	4,68	0,65	1,02
Sudeste	434,15	60,78	94,21
Minas Gerais	70,79	9,91	15,36
Espírito Santo	2,47	0,35	0,54
Rio de Janeiro	2,44	0,34	0,53
São Paulo	358,43	50,18	77,78
Sul	43,06	6,03	9,35
Paraná	42,07	5,89	9,13
Santa Catarina	0,31	0,044	0,067
Rio Grande do Sul	0,68	0,095	0,15
Centro-Oeste	143,48	20,09	31,14
Mato Grosso do Sul	49,58	6,94	10,76
Mato Grosso	20,43	2,86	4,43
Goiás	73,45	10,28	15,94
Distrito Federal	0,017	0,0024	0,0037
Brasil	674,18	94,39	146,30

Os resultados foram mapeados por região e estado no QGIS. Nas Figuras 32 e 33, é mostrada a produção potencial de gás de síntese por região e estado. As regiões e os estados estão divididos por cor segundo seu potencial para produzir gás de síntese. Cores mais escuras correspondem a uma maior produção de gás de síntese. A subdivisão por estado permite uma melhor análise do potencial do gás de síntese.

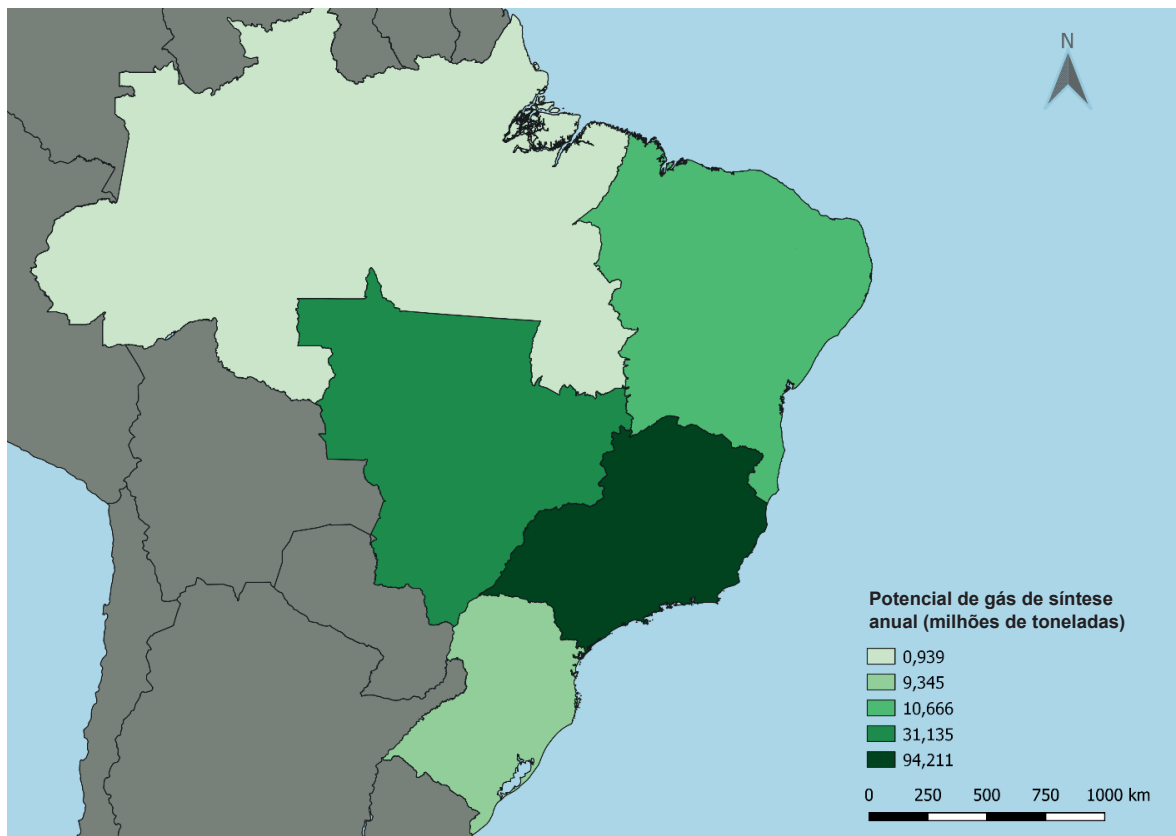


Figura 32: Produção potencial regional de gás de síntese a partir de resíduos agrícolas da cana-de-açúcar. Fonte: elaboração própria

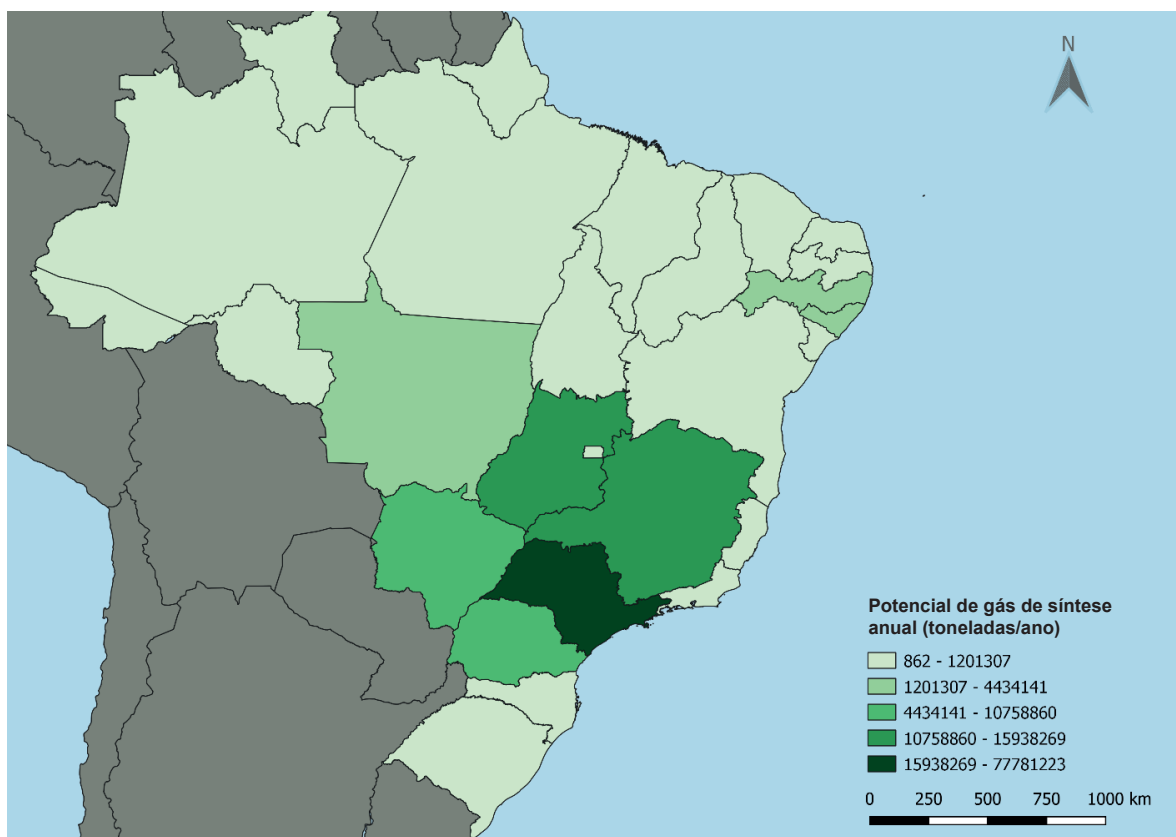


Figura 33: Produção potencial de gás de síntese a partir da conversão da palha de cana-de-açúcar por estado. Fonte: elaboração própria

A produção de cana-de-açúcar está fortemente concentrada na região Sudeste do país, com participação de 64% da colheita total em 2018. Com isso, essa é a região com maior produção de gás de síntese a partir da palha de cana-de-açúcar, seguida pela região Centro-Oeste, com 21%. Em 2018, a produção de cana-de-açúcar estava presente em todos os 26 estados e no Distrito Federal. São Paulo, que foi responsável por 53% da safra total de cana-de-açúcar, é o estado com o maior potencial de gás de síntese. É seguido, em ordem decrescente, pelos estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Paraná, todos localizados em seu entorno.

4.3.2. Indústria de bioetanol

No Capítulo 3, identificamos os subprodutos e resíduos da indústria brasileira de etanol de cana-de-açúcar. O bagaço resultante do processo de extração do açúcar e o CO_2 emitido a partir de sua cogeração e do processo de fermentação são considerados adequados para a produção de gás de síntese. O bagaço de cana-de-açúcar é utilizado na produção convencional de açúcar e etanol para gerar energia para o autoabastecimento, em especial para a demanda doméstica no Brasil, que resulta na emissão de CO_2 da combustão. O bagaço de cana-de-açúcar em si não será aprofundado neste estudo, uma vez que não há interferência no processo industrial. O CO_2 resultante da combustão também não será considerado em maior detalhe devido à matriz de avaliação do Capítulo 3, que não inclui o setor de geração de energia (nem de combustíveis fósseis ou de biomassa). Neste estudo, apenas as emissões de CO_2 relativamente puro durante o processo de fermentação da indústria de bioetanol serão consideradas para a produção de gás de síntese.

Atualmente, quase toda a produção em escala industrial de etanol pertence à primeira geração de biocombustíveis (Lenartsson et al., 2014). Em 2019, havia 373 usinas de etanol no Brasil, das quais 370 produziam mais de 99% e pertenciam à primeira geração, e 3 produziam etanol de segunda geração, lignocelulósico (Barros & Flake, 2019).

4.3.2.1. Estimativa de subprodutos e resíduos

Para estimar as emissões de CO_2 do processo de fermentação, os dados sobre a produção anual de etanol foram obtidos do anuário estatístico de 2019 da ANP. Os dados de produção de etanol hidratado e anidro foram considerados juntos porque ambos incluem o processo de fermentação. O fator de emissão do CO_2 relativamente puro é de 0,96 tonelada de CO_2 por tonelada de etanol hidratado ou anidro produzido (calculado para uma densidade de etanol de 789 kg/m^3). Na Tabela 25, é apresentada a distribuição regional da produção de etanol e as emissões estimadas de CO_2 em 2018.

4.3.2.2. Produção de gás de síntese

Com base na estimativa das emissões regionais de CO_2 do processo industrial, foi determinada a produção potencial de gás de síntese por meio de um processo de conversão indireta, a eletrólise co-SOEC. O fluxo de CO_2 liberado é puro, não sendo necessária tecnologia específica de captura de carbono para obter o CO_2 liberado em pressão atmosférica. Portanto, as emissões de CO_2 podem ser capturadas facilmente e convertidas em gás de síntese. O fator de conversão do processo de eletrólise co-SOEC considerado neste estudo (ver Capítulo 2) é que cada kg de CO_2 resulta em 0,84 kg de gás de síntese.

Tabela 25: Potencial da indústria de bioetanol para produzir gás de síntese a partir das emissões estimadas de CO₂ por região e estado. Fonte: ANP (2019) e elaboração própria

Região e estado	Produção de etanol em 2018 (m ³)	CO ₂ por processo de fermentação (milhões de toneladas)	Produção de gás de síntese (milhões de toneladas)
Norte	205.540	0,16	0,13
Rondônia	1.390	0,001	0,0008
Amazonas	5.470	0,004	0,0035
Pará	43.460	0,033	0,028
Tocantins	176.270	0,13	0,11
Nordeste	2.006.090	1,52	1,28
Maranhão	147.620	0,12	0,11
Piauí	37.480	0,028	0,024
Rio Grande do Norte	114.900	0,087	0,073
Paraíba	430.810	0,33	0,27
Pernambuco	465.510	0,35	0,29
Alagoas	459.870	0,35	0,29
Sergipe	104.200	0,079	0,066
Bahia	245.700	0,19	0,15
Sudeste	19.700.000	14,92	12,53
Minas Gerais	3.257.510	2,47	2,07
Espírito Santo	127.570	0,097	0,081
Rio de Janeiro	97.260	0,074	0,062
São Paulo	16.217.660	12,28	10,32
Sul	1.626.200	1,23	1,03
Paraná	1.624.010	1,23	1,03
Rio Grande do Sul	2.190	0,0016	0,0013
Centro-Oeste	9.518.600	7,21	6,06
Mato Grosso do Sul	3.264.480	2,47	2,08
Mato Grosso	1.757.560	1,33	1,12
Goiás	4.496.560	3,41	2,86
Brasil	33.056.440	25,04	21,03

Os resultados foram mapeados por região e estado no QGIS. Nas Figuras 34 e 35, é mostrada a produção potencial de gás de síntese por região e estado. As regiões e os estados estão divididos por cor segundo seu potencial para produzir gás de síntese. Cores mais escuras correspondem a uma maior produção de gás de síntese. A subdivisão por estado e a distribuição das plantas mostradas na Figura 35 permitem uma melhor análise do potencial de gás de síntese. A distribuição das plantas foi obtida da EPE.

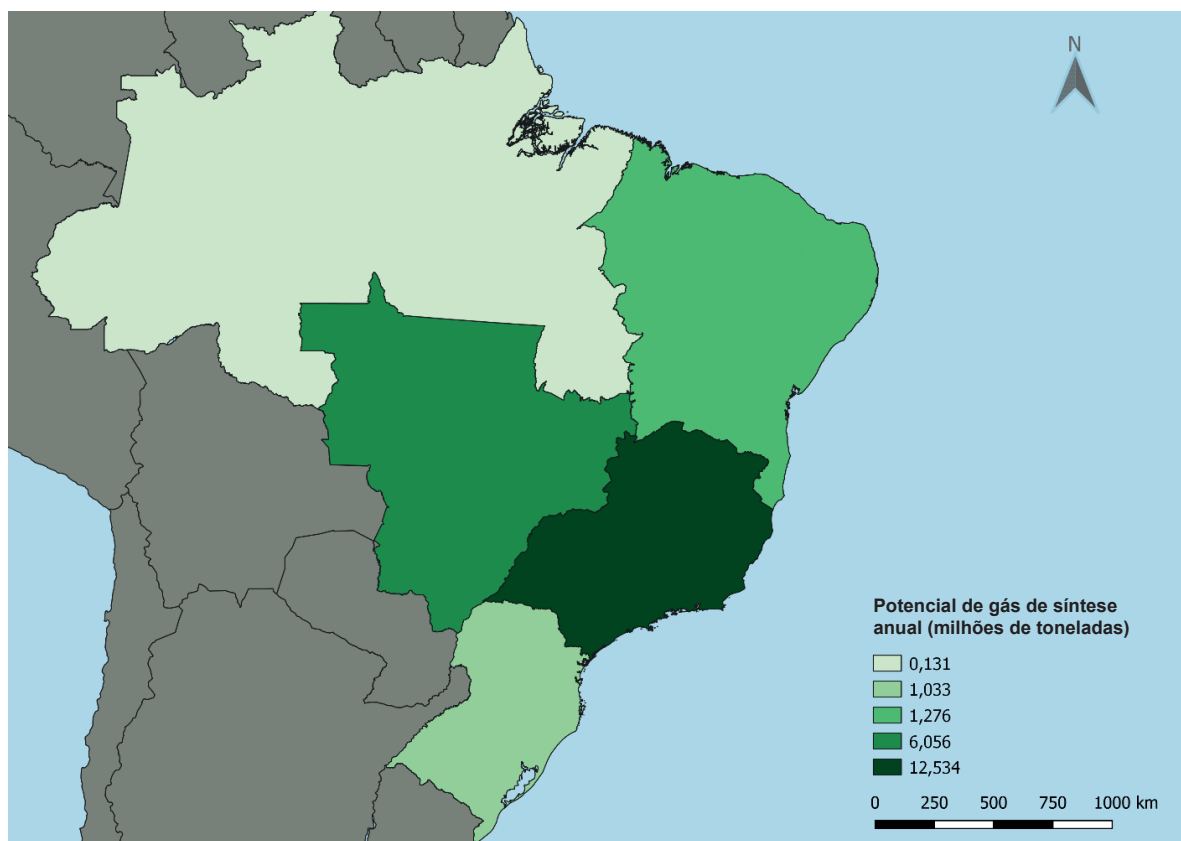


Figura 34: Potencial da indústria de bioetanol para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria

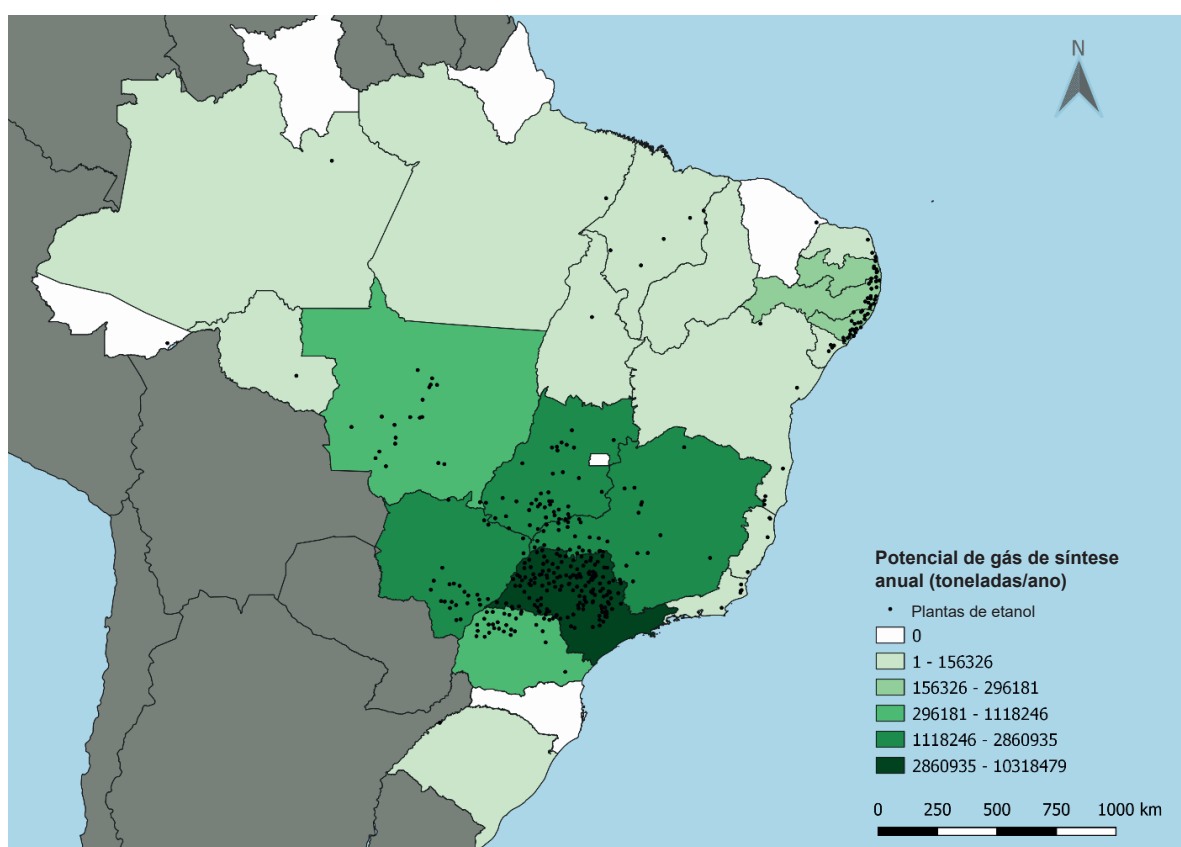


Figura 35: Potencial da indústria de bioetanol para produzir gás de síntese por estado e distribuição de plantas. Fonte: elaboração própria

O Sudeste, região com o maior número de plantas produtoras, teve participação de 59,6% na produção total de etanol no Brasil em 2018. Portanto, essa é a região com o maior potencial para gerar gás de síntese, seguida pelo Centro-Oeste com uma participação de 28%. O estado de São Paulo, onde está localizada a maioria das plantas de etanol, tem o maior potencial de produção de gás de síntese, com 49% do total. Em seguida, vêm os estados de Goiás e Mato Grosso do Sul, no Centro-Oeste, e Minas Gerais, no Sudeste, com participações de 13,6%, 9,9% e 9,8%, respectivamente.

4.4. Indústria da soja

Os resíduos da indústria da soja são palha de soja da colheita e glicerol e efluentes da indústria de biodiesel. A seguir, são estimados e mapeados os subprodutos e resíduos adequados e seu potencial para produzir gás de síntese.

4.4.1. Resíduos agrícolas

4.4.1.1. Estimativa de resíduos

Para estimar os resíduos agrícolas da produção de soja no Brasil, dados da produção anual por região e estado em 2018 foram obtidos do LSPA (IBGE, 2019). Considerando o fator assumido no Capítulo 3, cada tonelada de soja resulta em 1,52 tonelada de palha de soja. Os resíduos estimados por região e estado são mostrados na Tabela 26.

4.4.1.2. Produção de gás de síntese

Com base na estimativa da palha de soja gerada em 2018, foi determinada a produção potencial de gás de síntese por meio de um processo de conversão direta. Para tanto, considerou-se a gaseificação de leito fluidizado da palha de soja, conforme apresentado no Capítulo 2. A quantidade de gás de síntese produzida através da gaseificação de 1 kg de palha foi estimada usando a equação geral 4 (ver Capítulo 2).

$$\eta_{FB} = \frac{LHV_{Gás\ de\ síntese} * X_{kg\ Gás\ de\ síntese}}{LHV_{Palha\ de\ soja} * X_{kg\ Palha\ de\ soja}} \quad (9)$$

O fator de conversão foi determinado seguindo essa equação e informações da Tabela 5 e da Tabela 2 do Anexo, que fornece o LHV para a palha de soja. A gaseificação de leito fluidizado de 1 kg de palha de soja resulta em 1,67 kg de gás de síntese. Com a gaseificação de fluxo arrastado, 1 kg de palha de soja gera 1,33 kg de gás de síntese. A Tabela 26 mostra a produção de gás de síntese por região e estado por meio da gaseificação de leito fluidizado.

Tabela 26: Estimativa de resíduos agrícolas e produção potencial de gás de síntese da indústria da soja por região e estado. Fonte: IBGE (2019) e elaboração própria

Região e estado	Produção de soja em 2018 (milhões de toneladas)	Produção de resíduos de soja em 2018 (milhões de toneladas)	Produção de gás de síntese a partir da palha de soja (milhões de toneladas)
Norte	5,32	8,08	13,51
Rondônia	0,99	1,50	2,51
Acre	0,0014	0,0021	0,0036
Roraima	0,053	0,081	0,13
Pará	1,64	2,49	4,16
Amapá	0,054	0,082	0,14
Tocantins	2,58	3,93	6,55
Nordeste	11,47	17,44	29,12
Maranhão	2,75	4,18	6,98
Piauí	2,47	3,75	6,27
Bahia	6,24	9,49	15,85
Sudeste	8,85	13,45	22,45
Minas Gerais	5,44	8,26	13,79
São Paulo	3,41	5,18	8,65
Sul	39,15	59,51	99,39
Paraná	19,27	29,28	48,91
Santa Catarina	2,34	3,57	5,96
Rio Grande do Sul	17,54	26,65	44,52
Centro-Oeste	53,04	80,62	134,64
Mato Grosso do Sul	9,87	14,99	25,05
Mato Grosso	31,61	48,04	80,23
Goiás	11,31	17,19	28,72
Distrito Federal	0,25	0,38	0,64
Brasil	117,83	179,11	299,11

Os resultados foram mapeados por região e estado no QGIS. Nas Figuras 36 e 37, é mostrada a produção potencial de gás de síntese por região e estado. As regiões e os estados estão divididos por cor segundo seu potencial para produzir gás de síntese. Cores mais escuras correspondem a uma maior produção de gás de síntese. A subdivisão por estado permite uma melhor análise do potencial do gás de síntese.

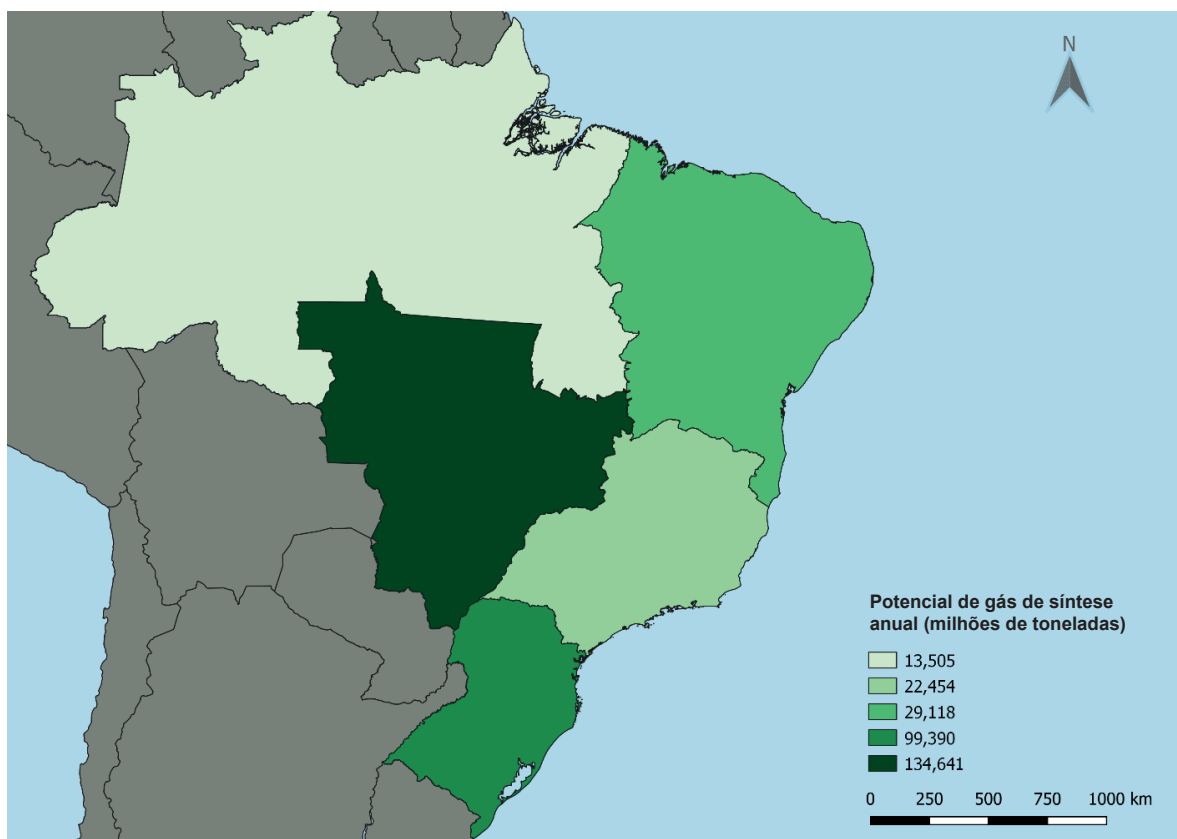


Figura 36: Produção potencial regional de gás de síntese a partir de resíduos agrícolas da soja. Fonte: elaboração própria

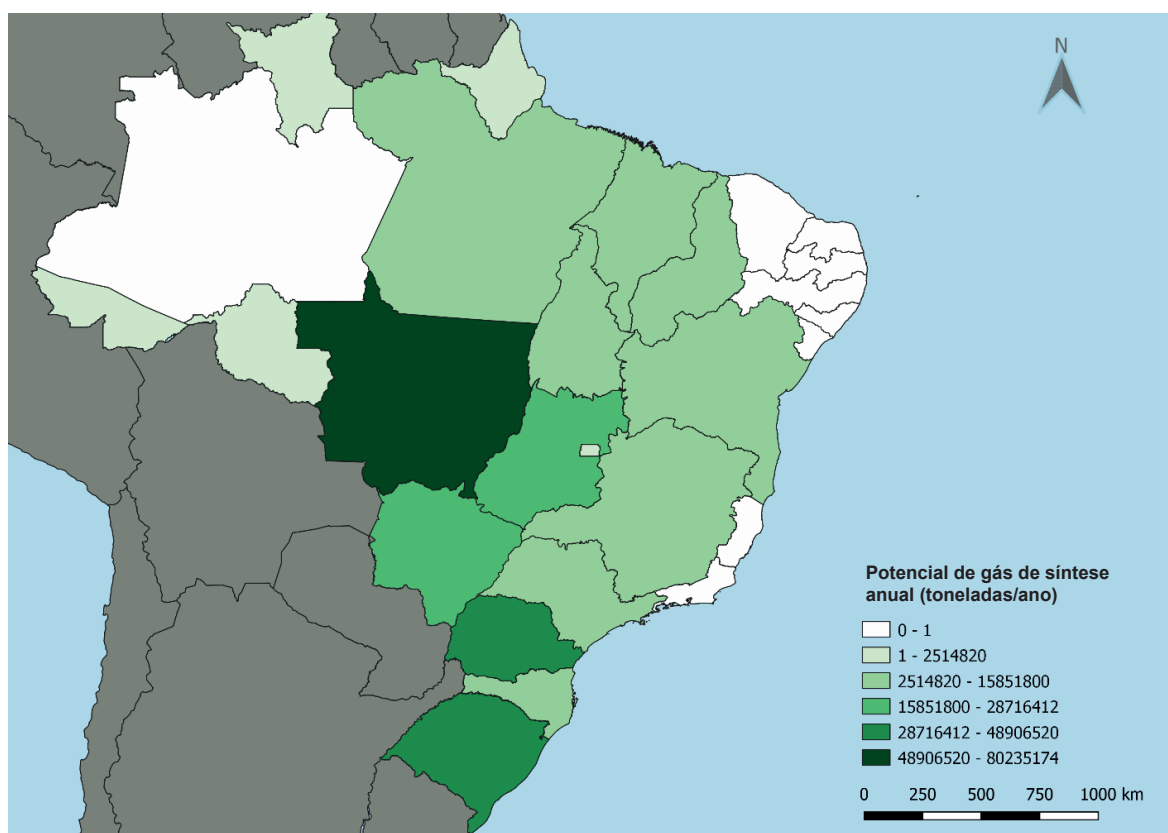


Figura 37: Produção potencial de gás de síntese a partir da conversão da palha de soja por estado. Fonte: elaboração própria

REFERENCES



4.4.2.1. Estimativa de subprodutos e resíduos

A quantidade de glicerol produzida anualmente pela indústria brasileira de biodiesel é divulgada e atualizada pela ANP. Os dados da produção de glicerol em 2018 foram obtidos do anuário estatístico de 2019 da ANP e convertidos em toneladas, considerando uma densidade de $1.261,3 \text{ kg/m}^3$. Na Tabela 27, é mostrada a produção de glicerol por região e estado em 2018. Em 2018, a produção de glicerol no Brasil foi de cerca de 440,6 milhões de toneladas, um aumento de 17,6% em relação a 2017. O Sul lidera essa produção, com 40,7% de participação, seguido de perto pelo Centro-Oeste, com 39,7%.

4.4.2.2. Produção de gás de síntese

Com base na produção de glicerol em 2018, a produção potencial de gás de síntese foi determinada por meio de um processo de conversão direta. No Capítulo 2, foram apresentados diferentes processos de conversão de glicerol em gás de síntese. Verificou-se que o processo de reforma do glicerol traz vantagens. Esse processo converte 1 kg de glicerol com um teor de 30% em 0,43 kg de gás de síntese. Usando esse fator de conversão, a produção potencial de gás de síntese por região e estado foi estimada, como mostra a Tabela 27.

Tabela 27: Potencial da indústria de biodiesel para produzir gás de síntese por região e estado. Fonte: dados de produção anual da ANP (2019) e elaboração própria

Região e estado	Produção de glicerol em 2018 (t)	Produção de gás de síntese a partir do glicerol (t)
Norte	16.235	6.981
Rondônia	9.458	4.067
Pará	0	0
Tocantins	6.777	2.914
Nordeste	42.858	18.429
Ceará	0	0
Rio Grande do Norte	0	0
Bahia	42.858	18.429
Sudeste	49.898	21.456
Minas Gerais	15.305	6.581
Rio de Janeiro	8.581	3.690
São Paulo	26.013	11.186
Sul	225.968	97.166
Paraná	64.449	27.713
Santa Catarina	13.868	5.963
Rio Grande do Sul	147.652	63.490
Centro-Oeste	220.804	94.946
Mato Grosso do Sul	30.159	12.968
Mato Grosso	125.151	53.815
Goiás	65.494	28.163
Brasil	555.764	238.979

Os resultados foram mapeados por região e estado no QGIS. Nas Figuras 39 e 40, é mostrada a produção potencial de gás de síntese por região e estado. As regiões e os estados estão divididos por cor segundo seu potencial para produzir gás de síntese. Cores mais escuras correspondem a uma maior produção de gás de síntese. A subdivisão por estado e a distribuição das plantas permitem uma melhor análise do potencial do gás de síntese. A distribuição das plantas foi obtida da EPE.

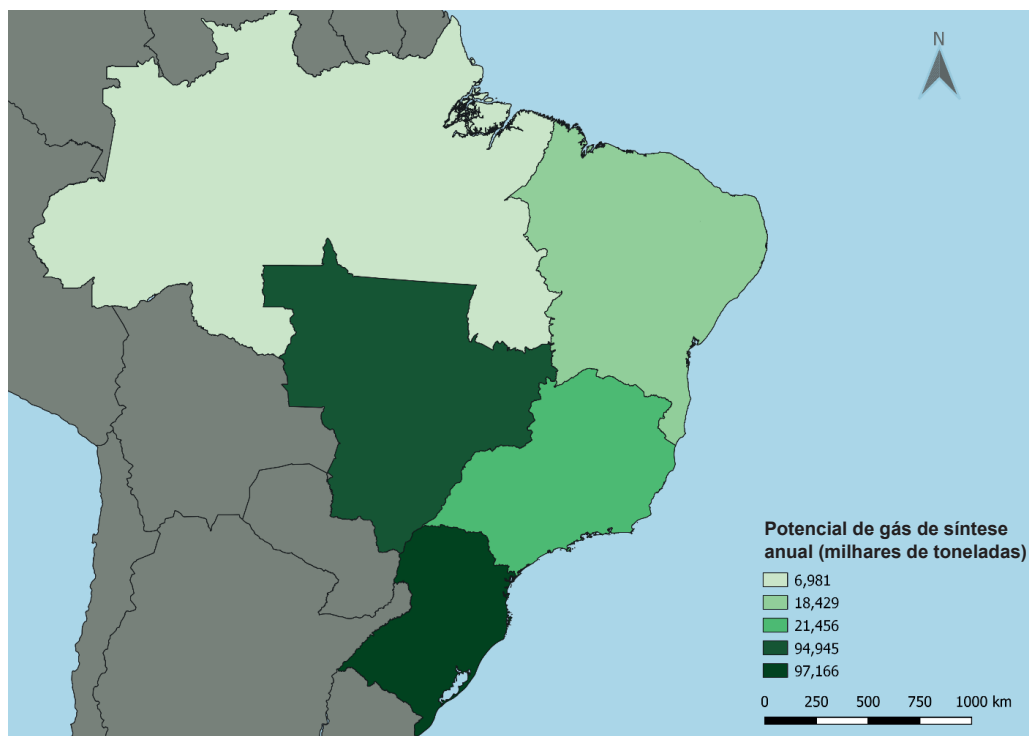


Figura 39: Potencial da indústria de biodiesel para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria

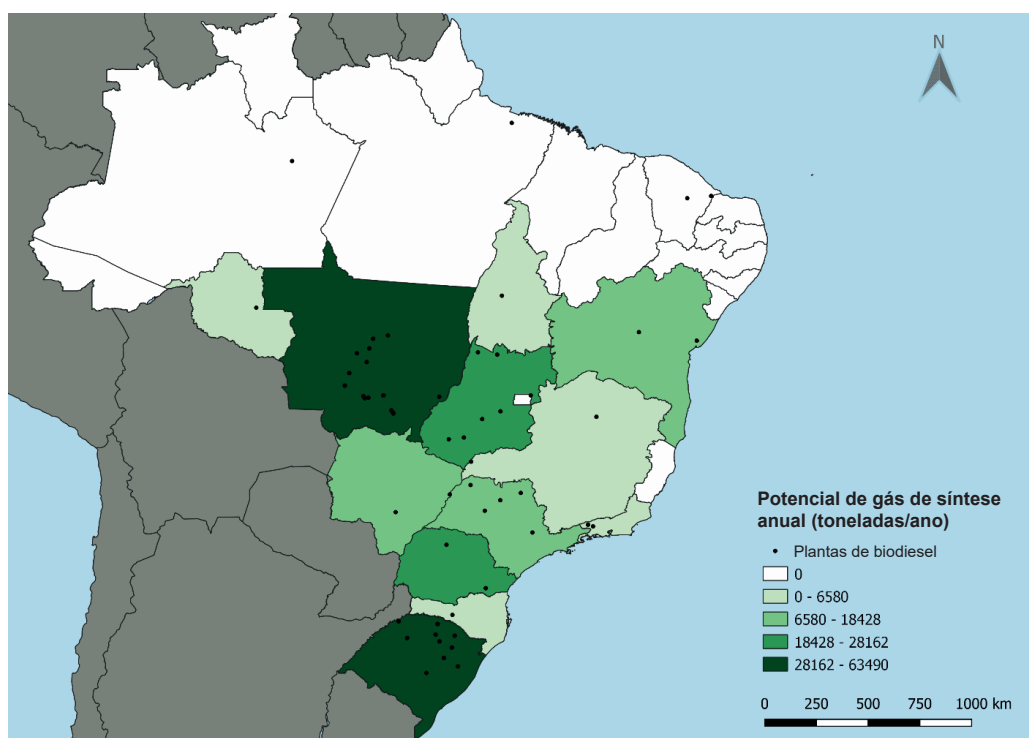


Figura 40: Potencial da indústria de biodiesel para produzir gás de síntese por estado e distribuição de plantas. Fonte: elaboração própria

O Sul e o Centro-Oeste são as regiões mais favoráveis para a produção de gás de síntese. O Rio Grande do Sul possui o maior potencial de gás de síntese, devido à sua participação de 26,5% da produção total e à proximidade de diferentes plantas de biodiesel no estado. O Rio Grande do Sul é seguido pelo Mato Grosso, no Centro-Oeste, que responde por 22,5% do potencial total de gás de síntese. Especialmente o sul desse estado é favorecido pela localização próxima de várias plantas de biodiesel. Rio Grande do Sul e Mato Grosso são seguidos pelos estados de Goiás, Paraná e Bahia. O Norte, com participação de 2,9%, é a região com menor potencial para produzir gás de síntese. A Bahia é o único estado do Nordeste com alto potencial, com participação de 7,7% da produção total de gás de síntese.

4.5. 4.5 Indústria de milho

No Capítulo 3, identificamos os subprodutos e resíduos da indústria do milho, entre os quais a palha de milho é considerada adequada para a produção de gás de síntese. A seguir, esse resíduo agrícola e seu potencial para produzir gás de síntese são estimados e mapeados.

4.5.1. Estimativa de resíduos

Para estimar os resíduos agrícolas da indústria brasileira de milho, dados da produção anual por região e estado em 2018 foram obtidos do LSPA (IBGE, 2019). Embora sejam divididos em primeira e segunda safra, esses dados são considerados como uma única safra neste estudo. Conforme discutido no Capítulo 3, cada tonelada de milho resulta em 1,25 tonelada de palha de milho. Com base na produção regional de milho em 2018, os resíduos foram estimados por região e estado, como mostra a Tabela 28.

4.5.2. Produção de gás de síntese

Com base na estimativa de palha de milho gerada em 2018, foi determinada a produção potencial de gás de síntese por meio de um processo de conversão direta. Para tanto, considerou-se a gaseificação de leito fluidizado da palha de milho, apresentada no Capítulo 2. A quantidade de gás de síntese obtida pela gaseificação de 1 kg de palha de milho foi estimada usando a equação geral 4 (ver Capítulo 2).

$$\eta_{FB} = \frac{LHV_{Gás\ de\ síntese} * X_{kgGás\ de\ síntese}}{LHV_{Palha\ de\ milho} * X_{kgPalha\ de\ milho}} \quad (10)$$

O fator de conversão foi determinado seguindo essa equação e informações da Tabela 5 e da Tabela 2 do Anexo, que fornece o LHV para a palha de milho. A gaseificação em leito fluidizado de 1 kg de palha de milho resulta em 1,56 kg de gás de síntese. Com a gaseificação de fluxo arrastado, 1 kg de palha de milho resulta em 1,23 kg de gás de síntese. A Tabela 28 mostra a produção de gás de síntese por região e estado por meio da gaseificação de leito fluidizado.

Tabela 28: Estimativa de resíduos agrícolas e produção potencial de gás de síntese da indústria do milho por região e estado. Fonte: dados de produção anual do IBGE (2019) e elaboração própria

Região e estado	Produção de milho em 2018 – 1ª e 2ª safra (milhões de toneladas)	Produção de resíduos de milho em 2018 (milhões de toneladas)	Produção de gás de síntese a partir de resíduos de milho (milhões de toneladas)
Norte	2,52	3,15	4,92
Rondônia	0,76	0,96	0,15
Acre	0,081	0,10	0,16
Amazonas	0,013	0,016	0,025
Roraima	0,056	0,070	0,11
Pará	0,79	0,99	1,54
Amapá	0,0011	0,0014	0,0023
Tocantins	0,81	1,02	1,58
Nordeste	5,64	7,05	10,99
Maranhão	1,32	1,65	2,58
Piauí	1,52	1,90	2,96
Ceará	0,47	0,59	0,93
Rio Grande do Norte	0,023	0,029	0,046
Paraíba	0,054	0,067	0-10
Pernambuco	0,055	0,068	0,11
Sergipe	0,16	0,20	0,31
Bahia	2,01	2,51	3,92
Sudeste	11,17	13,97	21,79
Minas Gerais	6,66	8,33	12,99
Espírito Santo	0,042	0,053	0,083
São Paulo	4,46	5,57	8,70
Sul	18,98	23,73	37,02
Paraná	11,86	14,83	23,13
Santa Catarina	2,56	3,19	4,98
Rio Grande do Sul	4,56	5,71	8,90
Centro-Oeste	40,74	50,92	83,94
Mato Grosso do Sul	7,42	9,28	14,48
Mato Grosso	26,17	32,72	51,04
Goiás	9,05	11,32	17,66
Distrito Federal	0,39	0,49	0,77
Brasil	81,36	101,71	158,66

Os resultados foram mapeados por região e estado no QGIS. Nas Figuras 41 e 42, é mostrada a produção potencial de gás de síntese por região e estado. As regiões e os estados estão divididos por cor segundo seu potencial para produzir gás de síntese. Cores mais escuras correspondem a uma maior produção de gás de síntese. A subdivisão por estado permite uma melhor análise do potencial do gás de síntese.

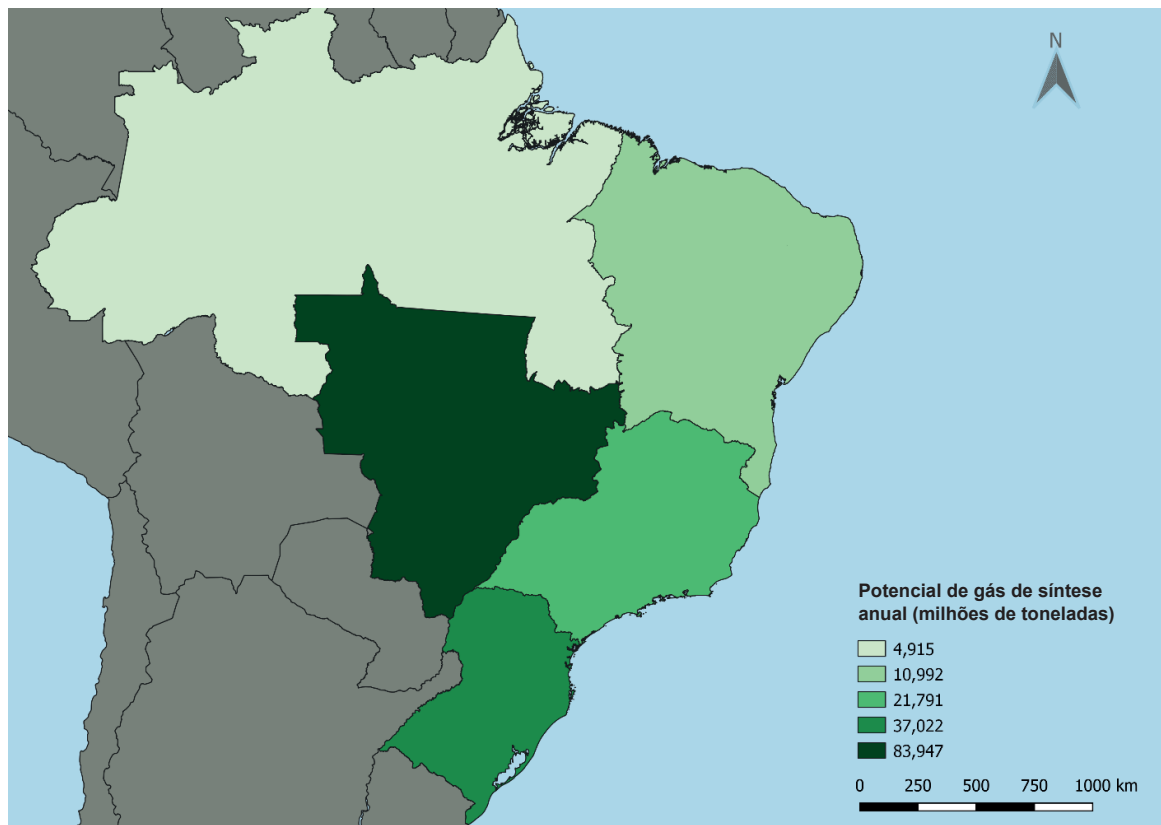


Figura 41: Potencial da indústria do milho para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria

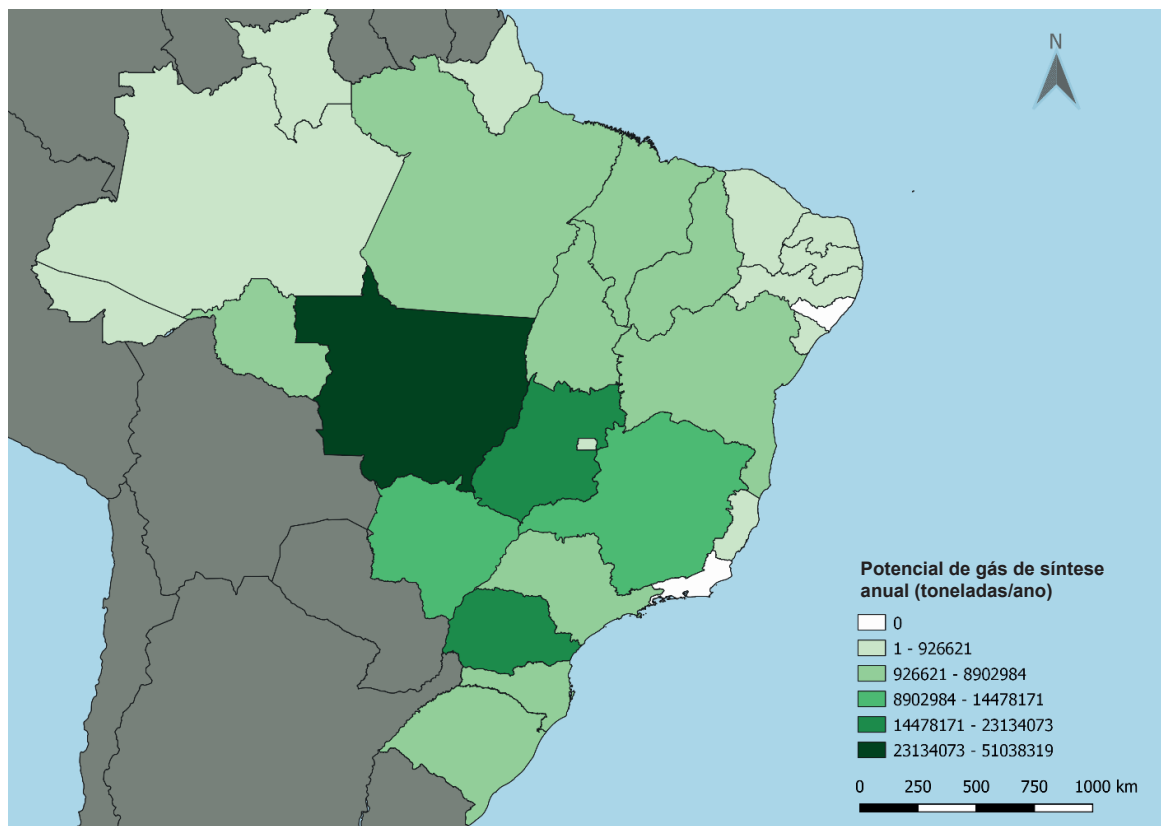


Figura 42: Produção potencial de gás de síntese a partir da conversão de palha de milho por estado. Fonte: elaboração própria

A região Centro-Oeste tem o maior potencial de produção de gás de síntese, com participação de 50% da produção total, seguida pelas regiões Sul e Sudeste, com 23% e 13%, respectivamente. O Norte é a região com o menor potencial de gás de síntese. Principal impulsionador do cultivo de milho, a região Centro-Oeste é onde fica o estado com mais alto potencial de gás de síntese em 2018, o Mato Grosso, maior produtor de milho e responsável por 32% da produção total de gás de síntese no mesmo ano. Em seguida, vêm o estado do Paraná, no Sul, e os estados de Goiás e Mato Grosso do Sul, no Centro-Oeste. É importante ressaltar que os períodos das duas safras diferem de região para região e mesmo de estado para estado; portanto, a geração de resíduos não é constante ao longo do ano no Brasil.

4.6. Indústria de arroz

No Capítulo 3, identificamos os resíduos agrícolas da indústria do arroz, que são a casca e a palha do arroz. Esses resíduos são adequados para conversão em produtos de valor agregado. A seguir, esses resíduos são estimados e seu potencial para produzir gás de síntese é determinado.

4.6.1. Estimativa de resíduos

Para estimar os resíduos agrícolas da indústria brasileira de arroz, dados da produção anual por região e estado em 2018 foram obtidos do LSPA (IBGE, 2019). Considerando o fator discutido no Capítulo 3, cada tonelada de arroz resulta em 1,24 tonelada de casca e palha de arroz. Com base na produção regional de arroz em 2018, os resíduos foram estimados por região e estado, como mostra a Tabela 29.

4.6.2. Produção de gás de síntese

Com base na estimativa de resíduos de arroz gerados em 2018, foi determinada a produção potencial de gás de síntese por meio de um processo de conversão direta. Para tanto, foi considerada a gaseificação de leito fluidizado dos resíduos, conforme apresentado no Capítulo 2. A quantidade de gás de síntese obtida através da gaseificação de 1 kg de resíduos de arroz foi estimada usando a equação geral 4 (ver Capítulo 2).

$$\eta_{FB} = \frac{LHV_{Gás\ de\ síntese} * X_{kg\ Gás\ de\ síntese}}{LHV_{Resíduos\ de\ arroz} * X_{kg\ Resíduos\ de\ arroz}} \quad (11)$$

O fator de conversão foi determinado seguindo essa equação e informações da Tabela 5 e da Tabela 2 do Anexo, que fornece o LHV para o arroz. A gaseificação de leito fluidizado de 1 kg de resíduos de arroz resulta em 1,43 kg de gás de síntese. Com a gaseificação de fluxo arrastado, 1 kg de resíduos de arroz resulta em 1,13 kg de gás de síntese. A Tabela 29 mostra a produção de gás de síntese por região e estado por meio da gaseificação de leito fluidizado.

Tabela 29: Estimativa de resíduos agrícolas e produção potencial de gás de síntese da indústria do arroz por região e estado. Fonte: dados de produção anual do IBGE (2019) e elaboração própria

Região e estado	Produção de arroz em 2018 (milhões de toneladas)	Produção de resíduos de arroz em 2018 (milhões de toneladas)	Produção de gás de síntese a partir de resíduos de arroz (milhões de toneladas)
Norte	0,96	1,19	1,70
Rondônia	0,11	0,14	0,19
Acre	0,0068	0,0084	0,012
Amazonas	0,012	0,015	0,021
Roraima	0,055	0,068	0,097
Pará	0,11	0,14	0,20
Amapá	0,0008	0,0010	0,0014
Tocantins	0,66	0,82	1,17
Nordeste	0,39	0,49	0,69
Maranhão	0,21	0,26	0,37
Piauí	0,11	0,14	0,19
Ceará	0,018	0,022	0,032
Sergipe	0,023	0,028	0,0040
Sudeste	0,058	0,072	0,10
São Paulo	0,058	0,072	0,10
Sul	9,63	11,94	17,07
Paraná	0,13	0,16	0,23
Santa Catarina	1,09	1,35	1,94
Rio Grande do Sul	8,40	10,42	14,90
Centro-Oeste	0,70	0,87	1,24
Mato Grosso	0,50	0,62	0,89
Mato Grosso do Sul	0,087	0,11	0,15
Goiás	0,11	0,14	0,20
Brasil	11,74	14,55	20,82

Os resultados foram mapeados por região e estado no QGIS. Nas Figuras 43 e 44, é mostrada a produção potencial de gás de síntese por região e estado. As regiões e os estados estão divididos por cor segundo seu potencial para produzir gás de síntese. Cores mais escuras correspondem a uma maior produção de gás de síntese. A subdivisão por estado permite uma melhor análise do potencial do gás de síntese.

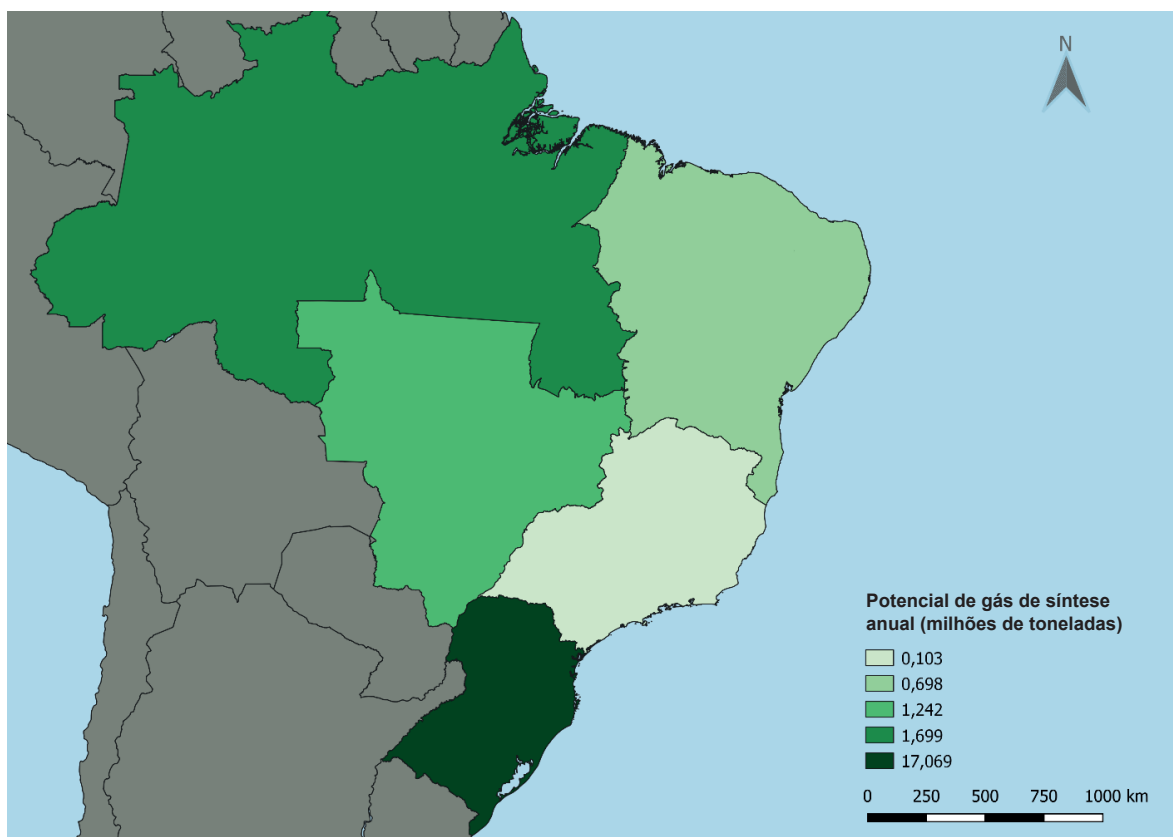


Figura 43: Potencial da indústria do arroz para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria

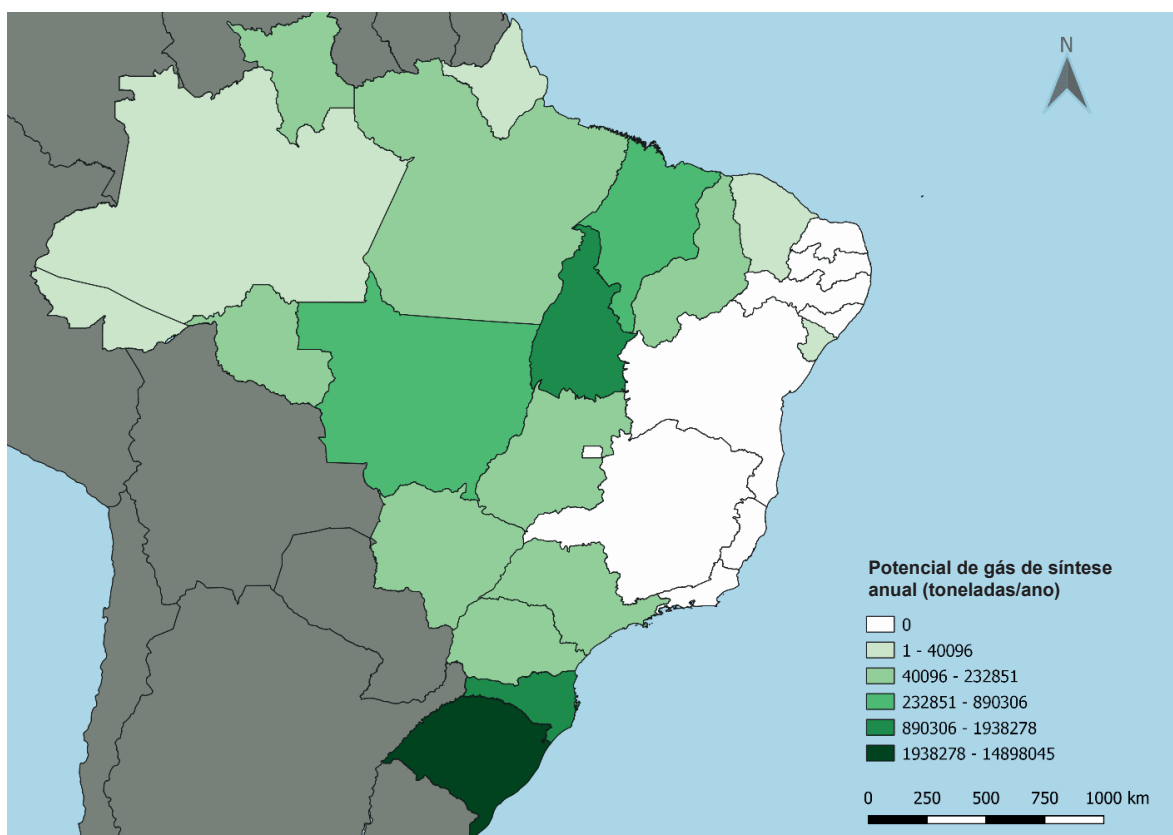


Figura 44: Produção potencial de gás de síntese a partir de resíduos agrícolas de arroz por estado. Fonte: elaboração própria

O Sul é a região que mais produz arroz no Brasil. Em 2018, 82% do arroz brasileiro eram colhidos nessa região. Como consequência, o Sul também tem o maior potencial para produzir gás de síntese. Ele é seguido pelo Norte e Centro-Oeste, com 8,2% e 6,0% da produção total, respectivamente. O estado do Rio Grande do Sul responde por quase todo o arroz produzido no Sul e tem o maior potencial de gás de síntese, com participação de 72% da produção total em 2018. Portanto, esse estado é o mais promissor para a produção de gás de síntese.

4.7. Indústria de celulose

No Capítulo 3, identificamos os subprodutos e resíduos da indústria brasileira de papel e celulose decorrentes de seu principal processo de produção. A indústria de celulose responde por quase todos os subprodutos e resíduos identificados. Cascas e resíduos de madeira do processo de preparação, licor negro e CO₂ emitido no processo de polpação, bem como lodo de papel e celulose da estação de tratamento de efluentes, são considerados adequados para a produção de gás de síntese. O licor negro é utilizado na produção convencional de celulose para recuperar o licor branco e garantir o autoabastecimento de energia. Devido ao pressuposto de que o processo industrial não deve ser alterado, apenas o CO₂ resultante da combustão do licor negro é analisado neste estudo. As cinzas da combustão de subprodutos e resíduos para a produção de energia geralmente são utilizadas na produção de materiais de construção, não existindo literatura sobre sua conversão em gás de síntese.

Há 61 empresas ativas na indústria brasileira de papel e celulose. A Figura 45 mostra a ampla distribuição geográfica dos produtores de papel e celulose no Brasil. Por se tratar de um setor que tem relacionamento direto com o mercado consumidor, as empresas concentram-se nas regiões Sul e Sudeste do país (IBÁ, 2019). Existem 71 fábricas de celulose em 14 estados, sendo 20 no Paraná e 17 em São Paulo (DEPEC, 2019).

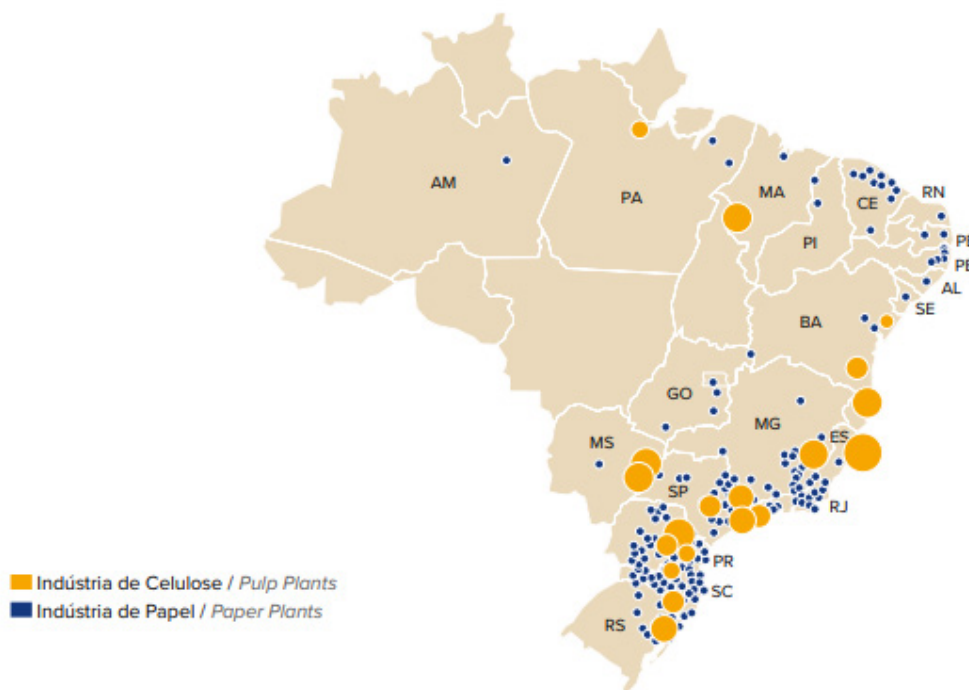


Figura 45: Distribuição da indústria brasileira de papel e celulose. Fonte: IBÁ (2019)

4.7.1. Estimativa de subprodutos e resíduos

Não foram encontrados dados públicos sobre a produção regional da indústria brasileira de celulose, nem do IBÁ nem de outras instituições. Para estimar os subprodutos e resíduos da indústria brasileira de celulose, foram obtidos dados da EPE, que os reuniu no Balanço Energético Nacional (BEN 2019), atualizado anualmente. Ressalta-se que esses dados não estão completos e mostram uma produção total de celulose inferior à reportada pelo IBÁ (2019). Na Tabela 30, apresenta-se a produção de celulose por região e estado.

Tabela 30: Produção brasileira de celulose por região e estado em 2018. Fonte: dados de produção anual da EPE

Região e estado	Produção de celulose em 2018 (milhões de toneladas)
Norte	-
Nordeste	4,81
Maranhão	1,48
Bahia	3,33
Sudeste	3,13
Espírito Santo	2,11
São Paulo	1,03
Sul	4,92
Paraná	2,47
Santa Catarina	0,58
Rio Grande do Sul	1,87
Centro-Oeste	1,33
Mato Grosso do Sul	1,33*
Brasil (EPE)	14,20
Total do Brasil (IBÁ, 2019)	21,08

*Dados de 2015 com taxa de crescimento de 7,1%.

Os dados da EPE e do IBÁ exibem uma diferença de cerca de 6,8 milhões de toneladas. Essa diferença pode ser devida a plantas de celulose não registradas — por exemplo, os estados do Pará e Minas Gerais produzem celulose, de acordo com a Figura 45, mas não são registrados no BEN. Os dados de produção de celulose de Mato Grosso do Sul estavam disponíveis apenas para 2015, por isso a produção de 2018 foi estimada com base no crescimento anual de 7,1% de 2012 até agora. Com base nos dados da produção regional de celulose em 2018, os subprodutos e resíduos industriais foram estimados e estão apresentados na Tabela 31.

Para a estimativa de *cascas e resíduos de madeira* gerados no processo de preparação e manuseio da madeira, foi tomada como referência uma fábrica de celulose kraft a partir de eucalipto na América do Sul (Kuparinen & Vakkilainen, 2017). A fábrica de celulose gera 0,15 tonelada de resíduo de madeira para cada tonelada de celulose.

A quantidade de *lodo de papel e celulose* pode ser estimada com a suposição de que 50 kg (0,05 tonelada) desse lodo são gerados na produção de 1 tonelada de papel (Cho et al., 2017) e de que 1 tonelada de celulose resulta em aproximadamente 1 tonelada de papel (Kuparinen et al., 2019).

Nas fábricas de celulose kraft, o CO_2 é formado principalmente durante a reação de queima dos combustíveis. As principais fontes de CO_2 são a caldeira de recuperação, o forno de cal e a caldeira de biomassa (quando presente). Para ser utilizado, o CO_2 emitido deve ser capturado por uma tecnologia de captura de carbono. Muito provavelmente, não é viável capturar o CO_2 de todos os fluxos de CO_2 possíveis; portanto, apenas a caldeira de recuperação, que é a maior fonte de CO_2 , foi considerada. Para estimar as emissões biogênicas de CO_2 pela caldeira de recuperação, considerou-se o fator de emissão de 1,8 tonelada de CO_2 por tonelada de celulose seca ao ar (Kuparinen et al., 2019).

Tabela 31: Estimativa de subprodutos e resíduos da produção brasileira de celulose em 2018. Fonte: dados de produção anual da EPE e elaboração própria

Região e estado	Produção de celulose em 2018 (milhões de toneladas)	Cascas e resíduos de madeira da produção de celulose (milhões de toneladas)	Lodo de papel e celulose (milhões de toneladas)	CO ₂ da produção de celulose (milhões de toneladas)
Norte	-	-	-	-
Nordeste	4,81	0,72	0,24	8,66
Maranhão	1,48	0,22	0,074	2,66
Bahia	3,33	0,50	0,17	5,99
Sudeste	3,13	0,47	0,16	5,64
Espírito Santo	2,11	0,32	0,11	3,79
São Paulo	1,03	0,15	0,05	1,85
Sul	4,92	0,74	0,246	8,85
Paraná	2,47	0,37	0,12	4,45
Santa Catarina	0,58	0,086	0,029	1,04
Rio Grande do Sul	1,87	0,28	0,094	3,37
Centro-Oeste	1,33	0,20	0,067	2,40
Mato Grosso do Sul	1,33*	0,20	0,067	2,40
Brasil	14,20	2,13	0,71	25,56

*Dados de 2015 com taxa de crescimento de 7,1%.

4.7.2. Produção de gás de síntese

4.7.2.1. Cascas e resíduos de madeira

Com base na estimativa de cascas e resíduos de madeira, foi determinada a produção potencial de gás de síntese por meio de um processo de conversão direta. A conversão de cascas e resíduos de madeira por meio da gaseificação já está em uso por algumas fábricas de papel e celulose, principalmente para a substituição de combustíveis fósseis no forno de cal, mas ainda não foi demonstrada em escala comercial. Isaksson (2015) faz uma revisão detalhada da literatura de estudos e plantas de produção. Antes da gaseificação, a biomassa deve ser pré-tratada e seca para remover partículas e melhorar a eficiência do processo (ver Capítulo 2). Neste estudo, para uma melhor comparação da gaseificação da biomassa, foi considerado um gaseificador de leito fluidizado, conforme apresentado no Capítulo 2. A quantidade de gás de síntese obtida com a gaseificação de 1 kg de cascas e resíduos de madeira foi estimada usando a equação geral 4 (ver Capítulo 2).

$$\eta_{FB} = \frac{LHV_{\text{Gás de síntese}} * X_{kg\text{Gás de síntese}}}{LHV_{\text{Cascas e resíduos de madeira}} * X_{kg\text{Cascas e resíduos de madeira}}} \quad (12)$$

O fator de conversão foi determinado seguindo essa equação e informações da Tabela 5 e da Tabela 2 do Anexo, que fornece o LHV para cavacos de eucalipto. O LHV para a madeira de eucalipto foi considerado porque o eucalipto, com 83% de participação, é a matéria-prima mais utilizada na indústria de papel e celulose. A gaseificação de 1 kg de cascas e resíduos de madeira pelo gaseificador de leito fluidizado resulta em 1,69 kg de gás de síntese. Com a gaseificação de fluxo arrastado, 1 kg de casca e resíduos de madeira resultam em 1,34 kg de gás de síntese.

4.7.2.2. Lodo de fábrica de papel

A conversão termoquímica de lodo de papel e celulose em gás de síntese vem despertando o interesse da indústria, e alguns estudos têm investigado processos termoquímicos. Cho et al. (2017) investigaram a pirólise de lodo de fábrica de papel com CO₂ como meio de reação para produzir gás de síntese e biochar magnético. A pirólise do lodo da fábrica em CO₂ gera 9,6 mol% de gás de síntese a 720°C. Em Chiang et al. (2016), conduziu-se um processo de cogaseificação em uma planta comercial em que 2 toneladas de lodo produziram 2,2 toneladas de gás de síntese. A produção de gás de síntese foi determinada assumindo esse fator de conversão com um gaseificador de leito fluidizado.

4.7.2.3. Dióxido de carbono

Com base nas estimativas de emissões regionais de CO₂, foi determinada a produção potencial de gás de síntese por meio de um processo de conversão indireta, a eletrólise co-SOEC. Para ser utilizado, o CO₂ emitido deve ser capturado por uma tecnologia de captura de carbono. De acordo com Kuparinen et al. (2019), não existem muitas análises técnico-econômicas detalhadas dos sistemas de captura de carbono para fábricas de celulose. A pós-combustão à base de amina, uma tecnologia comprovada e comercialmente disponível, será considerada neste estudo como a tecnologia para capturar o CO₂ da caldeira de recuperação para a produção de gás de síntese. Sua eficiência de captura é de 90%. Finalmente, com o fator de conversão do processo de eletrólise co-SOEC considerado neste estudo (ver Capítulo 2), cada kg de CO₂ resulta em 0,84 kg de gás de síntese. Na Tabela 32, é mostrada a produção de gás de síntese, por região e estado, por meio da gaseificação de leito fluidizado de diferentes subprodutos e resíduos.

Tabela 32: Produção potencial e total de gás de síntese na indústria de celulose. Fonte: elaboração própria

Região e estado	Gás de síntese a partir de cascas e resíduos (milhões de toneladas)	Gás de síntese a partir de lodo de fábrica de papel e celulose (milhões de toneladas)	Gás de síntese a partir de CO ₂ (milhões de toneladas)	Produção total de gás de síntese (milhões de toneladas)
Norte	-	-	-	-
Nordeste	1,22	0,53	6,55	8,30
Maranhão	0,37	0,16	2,01	2,55
Bahia	0,84	0,37	4,53	5,75
Sudeste	0,79	0,34	4,26	5,40
Espírito Santo	0,53	0,23	2,86	2,63
São Paulo	0,26	0,11	1,40	1,77

Sul	1,25	0,54	6,69	8,48
Paraná	0,63	0,27	3,36	4,26
Santa Catarina	0,15	0,063	0,78	0,99
Rio Grande do Sul	0,47	0,21	2,55	3,23
Centro-Oeste	0,34	0,15	1,82	2,30
Mato Grosso do Sul	0,34	0,15	1,82	2,30
Brasil	3,60	2,32	19,32	25,24

A produção total de gás de síntese foi mapeada por região e estado no QGIS. Nas Figuras 46 e 47, é mostrada a produção potencial de gás de síntese por região e estado. As regiões e os estados estão divididos por cor segundo seu potencial para produzir gás de síntese. Cores mais escuras correspondem a uma produção maior. A subdivisão por estado permite uma melhor análise do potencial do gás de síntese. As localizações das fábricas de celulose não são mostradas porque não foi encontrada literatura ou dados a respeito delas.

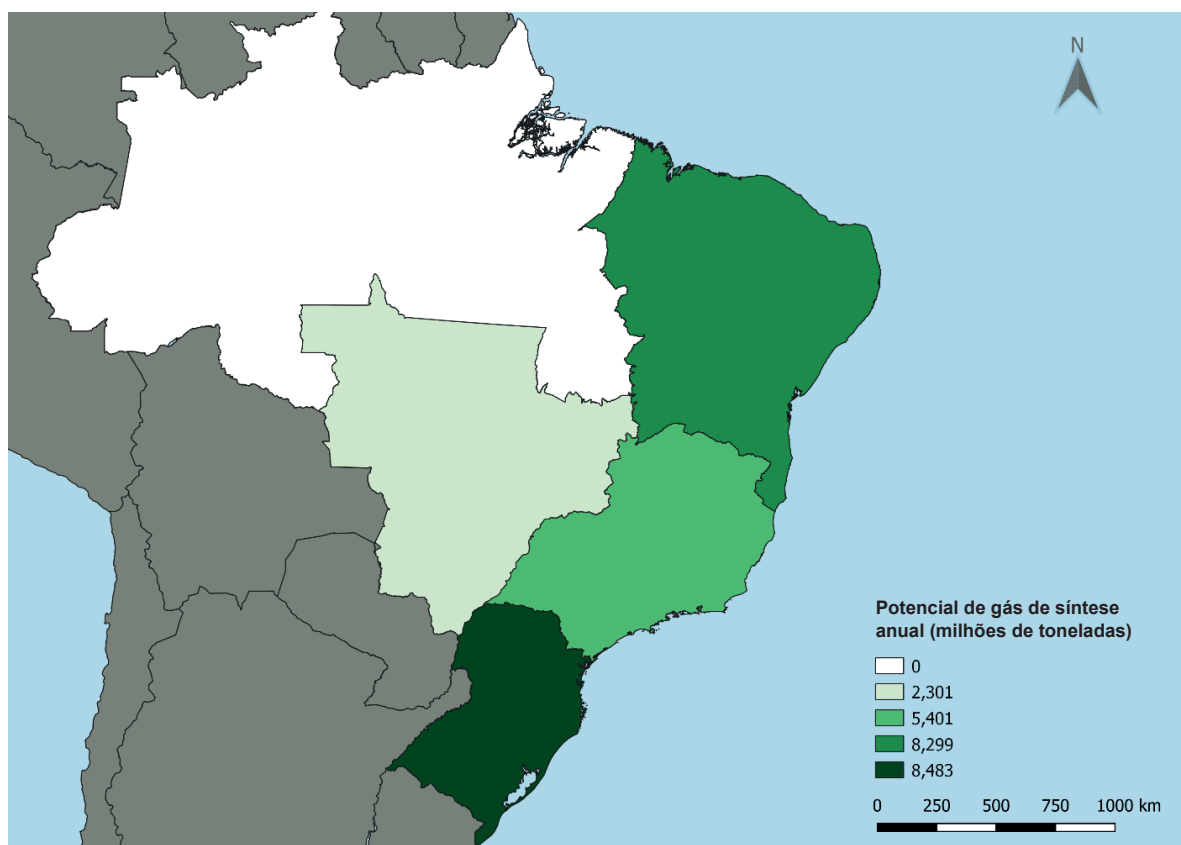


Figura 46: Potencial da indústria de celulose para a produção regional de gás de síntese. Fonte: elaboração própria

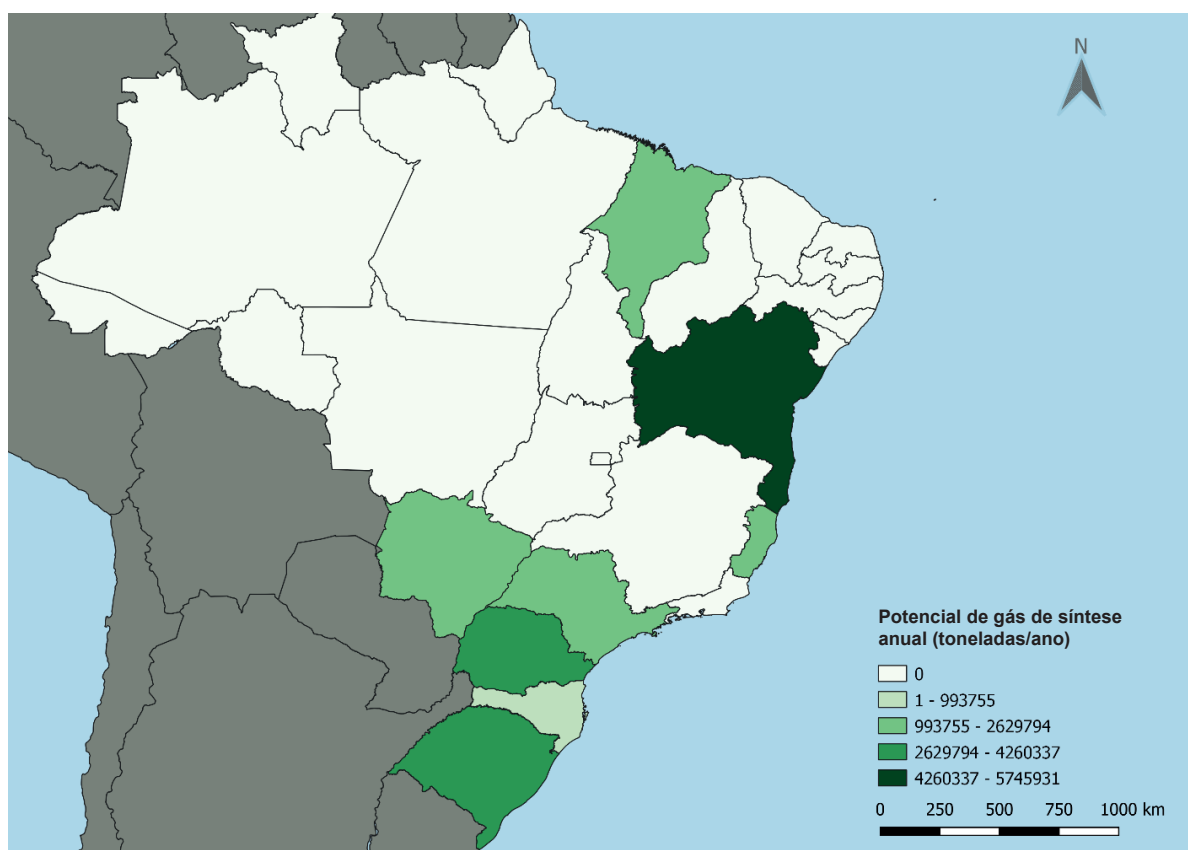


Figura 47: Potencial da indústria de celulose para produzir gás de síntese por estado. Fonte: elaboração própria

O Sul e o Nordeste do Brasil são as regiões com maior potencial para a produção de gás de síntese. A Bahia, no Nordeste, é o estado com maior potencial, com 16% da produção total de gás de síntese, seguida pelo Paraná e Espírito Santo, com 12% e 7% respectivamente.

4.8. Análise das indústrias quanto a seu potencial de produzir gás de síntese e possíveis locais para a geração de combustível de aviação PtL

4.8.1. Produção potencial de gás de síntese

Para a maior parte das indústrias, o Sudeste é a região com o maior potencial de produção de gás de síntese, seguido pelo Centro-Oeste e pelo Sul. O Nordeste e, em especial, o Norte apresentam potenciais menores, principalmente devido à falta dessas indústrias. Na Tabela 33, as indústrias analisadas neste estudo são comparadas em relação ao seu potencial de produzir gás de síntese.

A gaseificação dos resíduos agrícolas das indústrias de soja, milho e cana-de-açúcar representa de longe os maiores potenciais, produzindo respectivamente 299, 158 e 146 milhões de toneladas de gás de síntese por ano. As demais indústrias, como cimento, aço, celulose, arroz e etanol, têm um potencial anual entre 20 milhões e 31 milhões de toneladas de gás de síntese. Embora possua o menor potencial de gerar gás de síntese, a produção de biodiesel implica vantagens decisivas em relação às demais.

Tabela 33: Potencial de diferentes indústrias para produzir gás de síntese, seus subprodutos e resíduos. Fonte: elaboração própria

Indústria	Subproduto e resíduo	Potencial total anual para gás de síntese (toneladas)	Potencial máx. do estado (toneladas de gás de síntese/ano)
Indústria de cimento	Dióxido de carbono	22.267.418	5.297.780 (MG)
Indústria de aço	Dióxido de carbono	31.944.563	9.558.017 (MG)
Indústria de cana-de-açúcar			
• Cana-de-açúcar	Palha de cana	146.296.782	77.781.228 (SP)
• Etanol	Dióxido de carbono	21.032.147	10.318.479 (SP)
Indústria de soja			
• Soja	Palha de soja	299.108.536	80.235.174 (MT)
• Biodiesel	Glicerol	238.979	63.490 (RS)
Indústria de milho	Palha de milho	158.660.843	51.038.319 (MT)
Indústria de arroz	Palha/casca de arroz	20.810.901	14.898.045 (RS)
Indústria de celulose	Resíduos de madeira/lodo de fábrica de papel/CO ₂	25.236.865	5.745.931 (BA)

Além de ter o maior potencial de geração de gás de síntese, a gaseificação dos resíduos agrícolas demanda menos energia em comparação às demais indústrias analisadas. No entanto, requer etapas mais complexas de tratamento e limpeza de gás. Além disso, os resíduos agrícolas trazem grandes desafios logísticos devido à sua produção dispersa, baixa densidade aparente e natureza biodegradável, o que leva a altos custos de coleta, transporte e armazenamento (Carvalho et al., 2019). As indústrias de cimento, aço e celulose também têm alto potencial de gás de síntese, mas atualmente são as conversões com mais intenso consumo de energia devido à captura de carbono e à coeletrólise SOEC.

A produção de etanol também tem alta demanda de energia e, devido à pureza da matéria-prima, não implica processos adicionais de limpeza; portanto, sua demanda de energia para a produção de gás de síntese é menor do que a das outras três indústrias agrícolas. O glicerol da produção de biodiesel é um subproduto de baixo valor que desperta grande interesse para a posterior conversão no produto de valor agregado gás de síntese. A possibilidade de reformar o glicerol traz a vantagem de uma produção de gás de síntese mais limpa, com menos etapas do que a gaseificação e uma demanda de energia menor do que a da eletrólise co-SOEC. Portanto, apesar da baixa produção potencial de gás de síntese, essa é uma indústria adequada para a geração de SAF sob o conceito de biorrefinaria.

4.8.2. Possíveis locais para a produção de combustíveis sustentáveis de aviação

Com esse alto potencial para produzir gás de síntese, o Brasil pode facilmente superar sua crescente demanda por querosene de aviação com combustíveis sustentáveis de aviação. Especialmente os resíduos agrícolas das indústrias de soja, cana-de-açúcar e milho podem atender à atual demanda por combustível de aviação no Brasil apenas considerando os estados com maior potencial de produzir gás de síntese (Tabela 33). Considerando que cada kg de gás de síntese resulta em 0,336 litro de SAF pela rota de FT (Löchle, 2019), assumindo uma densidade de querosene de 0,8 kilogramas por litro, a indústria de soja em Mato Grosso pode produzir 21,56 milhões de toneladas de SAF a partir de resíduos, o que satisfaz facilmente a demanda brasileira de combustível de aviação, projetada em 14,2 milhões de toneladas em 2050. Somando a produção potencial total de gás de síntese das indústrias consideradas neste estudo, sua produção potencial de combustível é estimada em 193 milhões de toneladas de SAF. Em comparação, o consumo de combustível de aviação da Europa foi de 51 milhões de toneladas em 2017 (Eurostat, 2019).

Nem todas as fontes de matéria-prima e indústrias estão disponíveis para a produção de SAF; portanto, depois que o potencial de produção de gás de síntese das indústrias é determinado e mapeado por região e estado do Brasil, cabe identificar locais para a implementação de plantas de PtL para produzir SAF. Para tanto, são consideradas informações como os estados com maiores potenciais, a localização das plantas de produção industrial, possíveis *hotspots* para os resíduos agrícolas, a grande base de distribuição de querosene mais próxima para a mistura do SAF e os aeroportos grandes ou internacionais mais próximos. Carvalho et al. (2019), que investigaram o potencial de produção de bioquerosene de diferentes culturas agrícolas, identificaram possíveis *hotspots* para as culturas consideradas neste estudo com mapas de densidade de kernel. As maiores refinarias brasileiras para a produção de querosene em 2018 foram retiradas de Araujo (2019). Devido à falta de informações sobre a produção exata de cada planta, foi considerada a produção anual de SAF por todos os estados. Para mais informações sobre a localização de *hotspots* e grandes aeroportos, consultar Carvalho et al. (2019).

A Figura 48 mostra a indústria da soja com as plantas de biodiesel e o *hotspot* para palha de soja localizado no município de Sorriso, em Mato Grosso (região Centro-Oeste). Dada a ausência de uma grande base de distribuição naquela região, considera-se uma pequena base no município vizinho de Sinop (Carvalho et al., 2019). O aeroporto mais próximo é o Aeroporto Internacional Marechal Rondon, a 324 km do município. Pelos cálculos, o Rio Grande do Sul detém o maior potencial de produção de gás de síntese da indústria de biodiesel; porém, como é seguido diretamente por Mato Grosso, que possui um *hotspot* para a palha de soja, as plantas para a produção de SAF podem ser mais favoráveis em Mato Grosso. Esse estado pode produzir 21,56 milhões de toneladas de SAF com resíduos da soja e 14,5 mil toneladas de SAF com a produção de biodiesel.



Figura 48: Indústria da soja com possível hotspot para resíduos e locais importantes para a produção de SAF. Fonte: elaboração própria



Figura 49: Indústria de cana-de-açúcar com possível hotspot para resíduos e locais importantes para a produção de SAF. Fonte: elaboração própria

A Figura 49 mostra as plantas de produção de etanol e o *hotspot* de palha da cana-de-açúcar localizados no município de Morro Agudo, em São Paulo (região Sudeste). A grande base de distribuição de querosene mais próxima é a refinaria REPLAN, perto de Campinas, e os aeroportos mais próximos ao *hotspot* são o Aeroporto de Ribeirão Preto, a 56 km do município, e o Aeroporto Internacional de Viracopos, em Campinas, que fica mais próximo da refinaria REPLAN. A implementação de plantas para produzir SAF em torno desse *hotspot* pode ser favorável. O estado de São Paulo pode produzir 20,9 milhões de toneladas de SAF a partir de resíduos da cana-de-açúcar e 2,77 milhões de toneladas de SAF a partir do etanol.

Na Figura 50, é apresentado o caso das indústrias de cimento e aço no Brasil. Minas Gerais é o estado com o maior potencial de produção de gás de síntese para as duas indústrias. A Figura 51 mostra o estado de Minas Gerais e a concentração dessas indústrias em torno do município de Belo Horizonte. A grande base de distribuição de querosene mais próxima é a refinaria REGAP, e o aeroporto mais próximo é o Aeroporto Carlos Prates. A implantação de plantas para a produção de SAF nessa região pode ser favorável. O estado pode produzir 1,42 milhão de toneladas de SAF da indústria do cimento e 2,57 milhões de toneladas de SAF da indústria do aço.



Figura 50: Indústrias cimenteira e siderúrgica com locais importantes para a produção de SAF. Fonte: elaboração própria



Figura 51: Captura detalhada de possíveis locais para plantas de produção de SAF em Minas Gerais. Fonte: elaboração própria

A Figura 52 mostra a indústria de milho e arroz com seus respectivos *hotspots* para resíduos agrícolas. Existem dois *hotspots* para o milho: um em Mato Grosso (região Centro-Oeste), no município de Sorriso, e outro no Paraná (região Sul), no município de Tupassi. Como o município mato-grossense é o mesmo da indústria da soja, essa região pode ser mais interessante. Já para a indústria de arroz, que se concentra no Sul, o *hotspot* fica no município de Alegrete, no Rio Grande do Sul. As grandes bases de distribuição mais próximas são REPAR, no Paraná, e REFAP, no Rio Grande do Sul.

Os aeroportos indicados são o Aeroporto Internacional Marechal Rondon, a 316 km do *hotspot* do milho, em Mato Grosso; o Aeroporto Internacional das Cataratas, a 151 km do *hotspot* do milho, no Paraná; e o Aeroporto Salgado Filho, no Rio Grande do Sul, a 467 km do *hotspot* do arroz. A indústria do milho pode produzir 13,72 milhões de toneladas de SAF no Mato Grosso e 6,22 milhões de toneladas no Paraná. A indústria do arroz no Rio Grande do Sul pode produzir 4 milhões de toneladas de SAF.



Figura 52: Indústria de milho e arroz com possíveis hotspots de resíduos e locais importantes para a produção de SAF.
Fonte: elaboração própria

5. Conclusão e pesquisas futuras

5.1. Conclusão

Neste estudo, o potencial do setor industrial brasileiro para gerar gás de síntese foi investigado para identificar o Brasil como um *player* potencial na produção de combustíveis Power-to-Liquid (PtL). O gás de síntese, um intermediário versátil da síntese de Fischer-Tropsch, pode ser derivado da conversão de uma variedade de matérias-primas, como subprodutos e resíduos industriais. Os subprodutos e resíduos das indústrias brasileiras foram identificados e listados neste estudo.

Entre as indústrias adequadas para essa produção, as de soja, biodiesel, cana-de-açúcar, etanol, milho, arroz, aço, cimento e papel e celulose foram selecionadas por meio de uma matriz de avaliação e tiveram seus processos analisados. Essas indústrias fornecem resíduos adequados e subprodutos de baixo valor que podem ser usados para gerar gás de síntese e produtos de alto valor agregado, como combustível sustentável de aviação (SAF) ou qualquer outro combustível sintético, o que pode trazer benefícios econômicos, sociais e ambientais.

Após estimar a soma dos subprodutos e resíduos que cada uma dessas indústrias pode produzir, assumindo 2018 como ano de referência, foi determinada a produção potencial de gás de síntese por meio de processos de conversão. O potencial de produzir gás de síntese de cada setor foi mapeado por região e estado usando um sistema de informações geográficas, o QGIS. Essa análise revelou que a região Centro-Oeste tem o maior potencial de produção de gás de síntese (35% do total), seguida do Sudeste e do Sul, com 26% e 23%, respectivamente. Devido à ausência das indústrias analisadas nas regiões Nordeste e Norte, essas regiões apresentam menor participação no potencial total de gás de síntese. O Nordeste responde por 9,3% e o Norte, por apenas 3% desse potencial.

A gaseificação de resíduos agrícolas das indústrias de soja, milho e cana-de-açúcar tem, de longe, o maior potencial para gerar gás de síntese, com produções anuais respectivas de 299 milhões, 158 milhões e 146 milhões de toneladas. A ordem das demais indústrias em termos de seu potencial total de gás de síntese é aço, papel e celulose, cimento, etanol, arroz e biodiesel.

Apesar do menor potencial de gás de síntese da indústria de biodiesel, uma possível conversão por reforma, a pureza do substrato e a consequente simplicidade da limpeza do gás conferem vantagens sobre a gaseificação de resíduos agrícolas, que por sua vez impõem desafios como coleta, transporte e armazenamento da matéria-prima. Além disso, uma demanda menor de energia em comparação com a conversão por meio da eletrólise co-SOEC usada nas indústrias de cimento, aço, celulose e etanol torna a produção de biodiesel com glicerol um potencial impulsionador da produção de gás de síntese sob um conceito de biorrefinaria.

Considerando a produção potencial de gás de síntese de todas as indústrias, revela-se um impressionante potencial de produção de combustível de aviação de cerca de 193 milhões de toneladas de SAF. Esses elevados potenciais, bem como a situação geográfica amplamente favorável em relação às fontes de energia renovável e a vasta experiência em bioenergia e biocombustíveis, fazem do Brasil um importante *player* para os combustíveis PtL. O Brasil não só é capaz de superar facilmente sua crescente demanda por combustível de aviação, mas também pode fornecer ao setor europeu, ou a qualquer outro setor de aviação do mundo, combustível sintético de aviação sem impactos para o clima.

Além de mapear a produção de gás de síntese por região e estado, possíveis locais para plantas de produção de PtL foram identificados para a maioria das indústrias em nível estadual. Esses locais foram definidos considerando possíveis *hotspots* industriais com alto potencial de gás de síntese, bases de distribuição para misturar o SAF com o Jet-A1 e aeroportos próximos para aproveitamento do combustível. Um local potencial no caso da indústria da soja, incluindo a produção de biodiesel, fica em Mato Grosso (Centro-Oeste). Para a indústria do milho, Paraná (Sul) e Mato Grosso (Centro-Oeste) foram considerados adequados.

Quanto à indústria do arroz, o Rio Grande do Sul (Sul) foi considerado adequado e, para a indústria da cana-de-açúcar, incluindo a produção de etanol, o Norte do estado de São Paulo (Sudeste) foi considerado um local possível. O estado de Minas Gerais (Sudeste), especialmente as localidades próximas ao município de Belo Horizonte, foi considerado o mais favorável para as indústrias de cimento e aço. Esses são os locais onde o estabelecimento de biorrefinarias pode ser mais favorável. A indústria da soja, incluindo a produção de biodiesel, é a que detém o maior potencial de produção de gás de síntese no Brasil. Ela pode gerar 21,58 milhões de toneladas de SAF no Mato Grosso, majoritariamente a partir de resíduos agrícolas.

A localização das indústrias e os possíveis locais para a produção de SAF confirmam que o Norte do Brasil permanece uma região problemática no que diz respeito à distribuição de combustíveis. A abordagem descentralizada com querosene sintetizado a partir do ar ambiente terá que atender a demanda dessa região.

5.2. Limitações e estudos futuros

Este estudo apresenta limitações que podem ser abordadas em trabalhos futuros. Algumas indústrias e seus resíduos são adequados, mas não foram cobertos neste estudo, como resíduos florestais, resíduos animais, CO₂ proveniente da produção de biogás e ferroligas e resíduos urbanos, como biogás de tratamento de águas residuais. Eles podem ter alto potencial de gás de síntese e levar a distribuições regionais mais interessantes.

Um banco de dados mais preciso pode fornecer resultados mais confiáveis sobre as indústrias, em especial a de celulose, cujos dados de produção são mais inexatos e cujas fábricas não puderam ser localizadas acuradamente. Além disso, uma análise do potencial técnico e econômico usando dados com alta resolução espacial deve fornecer estimativas mais precisas do potencial de produção de gás de síntese no Brasil.

Uma nova avaliação técnico-econômica das regiões com possíveis locais de plantas SAF no Brasil é altamente recomendada para determinar as plantas e os locais mais adequados para as diferentes indústrias. Quanto aos subprodutos utilizados no próprio processo da indústria convencional (e portanto não analisados neste estudo, como bagaço e licor negro), pode ser uma solução mais econômica e eficiente a conversão para gás de síntese e SAF, a analisar em estudos futuros.

Quanto à conversão de resíduos agrícolas, a viabilidade da torrefação como uma etapa de pré-tratamento pode ser investigada especialmente no que diz respeito aos requisitos do gás de síntese da síntese de Fischer-Tropsch. Além disso, o gaseificador de fluxo arrastado do projeto bioliq, do Instituto de Tecnologia de Karlsruhe, que se concentra na gaseificação de resíduos de biomassa em grande escala, pode ser uma solução mais viável para a gaseificação de resíduos agrícolas do que um gaseificador de leito fluidizado comercial.

6. Referências

- Aberg, K. (2014) *Syngas production by integrating thermal conversion processes in an existing biorefinery*. Tese. Department of Applied Physics and Electronics. ISBN: 978-91-7601-101-0
- Adhikari, S. (2013) *Biomass characterization and gasification*. Biosystems Engineering Department, UA.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). (2019) *Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis*. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/5237-anuario-estatistico-2019>. [Acessado em 22 abr. 2021].
- Agora Energiewende. (2019) *Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement*. Berlin.
- Allegue, L. B. & Hinge, J. (2012) *Biogas and bio-syngas upgrading*. Aarhus, Danish Technological Institute.
- Almansa, G. A. & Kroon, P. (2016) *Towards green iron and steel industry: Opportunities for MILENA biomass gasification technology in Direct Reduction of Iron*. ECN.
- American Coke and Coal Chemicals Institute. *The coke oven by-product plan*. [n.d.]. Disponível em: <http://www.accci.org/Byproduct.pdf> [Acessado em 3 maio 2021].
- Amin, M., Patel, J., Selvakannan, P. R., Sage, V. (2015) *Tri-reforming of methane for the production of syngas: Review on the process, catalysts and kinetic mechanism*. Centre for Advanced Materials and Industrial Chemistry, RMIT University Melbourne Australia.
- Araujo, R. B. (2019) *Perspectivas e planejamento setorial para cadeia do biodiesel e novos biocombustíveis no Brasil*. In: *VII Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação de Biodiesel*, 4-7 nov. 2019, Florianópolis.
- Bajay, S. V., Nogueira, L., Sousa, F. R. de. (2010) *Ethanol in the Brazilian Energy Matrix*. In: Sousa, E. L. L. & Macedo, I. C. (coords.) *Ethanol and bioelectricity: Sugarcane in the future of the energy matrix*. São Paulo, Única, pp. 261-308.
- Bala-Litwiniak, A. & Radomiak, H. (2018) *Possibility of the utilization of waste glycerol as an addition to wood pellets*. *Waste and Biomass Valorization*. 10(8), 2193-2199.
- Barros, S. & Flake, O. (2019) *Brazils Biofuels Annual 2019*. USDA Foreign Agricultural Service; Global Agricultural Information Network.
- Brazilian Association of Rice Industry (Abiarroz). (2021) *Brazilian rice*. Disponível em: <http://brazilianrice.com.br/en/sobre-o-brasil/> [Acessado em 1 mar. 2020].

- Briesemeister, L., Wittmann, T., Gaderer, M. & Spielhoff, H. (2014) Study of a decentralized entrained flow gasification plant in combination with biomass from hydrothermal carbonization for CHP. Technical University of Munich.
- Carvalho, F., da Silva, F. T. F., Szklo, A., Portugal-Pereira, J. (2019) Potential for biojet production from different biomass feedstocks and consolidated technological routes: a georeferencing and spatial analysis in Brazil. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 13(6), 1454-1475.
- Confederation of European Paper Industries (CEPI). (2003) *Discovering the high potential of Pulp and Paper Production Residues*. Belgium, CEPI.
- Chen, L., Gangadharan, P., Lou, H.H. (2018). Sustainability assessment of combined steam and dry reforming versus tri-reforming of methane for syngas production. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. 13(2), e2168.
- Chhiti, Y. & Kemiha, M. (2013) Thermal conversion of biomass, pyrolysis and gasification: A review. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*. 2(3), 75-85.
- Chiang, K.-Y., Lu, C.-H., Liao, C.-K. & Ger, R. H.-R. (2016) Characteristics of hydrogen energy yield by co-gasified of sewage sludge and paper-mill sludge in a commercial scale plant. *International Journal of Hydrogen Energy*. 41(46), 21641-21648.
- Chiche, D., Diverchy, C., Lucquin, A.-C., Porcheron, F., Defoort, F. (2013) Synthesis gas purification. *Oil and GAS Science and Technology – Institute in France*. 68(4), 707-723.
- Cho, S.-W., Kwon, G., Yoon, K. & Kwon, E. E. (2017) Simultaneous production of syngas and magnetic biochar via pyrolysis of paper mill sludge using CO₂ as reaction medium. *Energy Conversion and Management*. 145, 1-9.
- Climeworks AG. (n.d.). Capturing CO₂ from air; Climework direct air capture plants. Disponível em: <https://www.climeworks.com/our-technology/> [Acessado em 25 mar. 2020].
- Confederação Nacional da Indústria (CNI). (2017) *A indústria do aço no Brasil*. Brasília, CNI.
- Confederação Nacional da Indústria (CNI). (2018) *Mudança do clima e indústria brasileira: Iniciativas e recomendações estratégicas para implementação e financiamento da NDC do Brasil*. Brasília, CNI.
- Cormos, C.-C. (2016) Evaluation of reactive absorption and adsorption systems for post-combustion CO₂ capture applied to iron and steel industry. *Applied Thermal Engineering*. 105, 56-64.
- Costa, M., Massarotti, N., Capuccio, G., Chang, C. T., Shiue, A., Lin, C., Wang, Y. (2014) Modeling of syngas production from biomass energy resources available in Taiwan. *Journal of the Italian Association of Chemical Engineering (AIDIC)*. 37, 343-348.
- Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos (DEPEC). (2019) *Papel e celulose*. Bradesco.
- Deutsche Energie Agentur (DENA). (2019a). *Powerfuels in aviation: Factsheet*. Disponível em: https://www.powerfuels.org/fileadmin/gap/Publikationen/Factsheets/190612_dena_FS_Aviation_eng_web.pdf [Acessado em 21 abr. 2021].

- Deutsche Energie Agentur (DENA). (2019b). *Powerfuels: Missing link to a successful global energy transition*. Disponível em: https://www.powerfuels.org/fileadmin/gap/Publikationen/Green_Paper/Global_Alliance_Powerfuels_Powerfuels-A_missing_link_to_a_successful_global_energy_transition.PDF [Acessado em 21 abr. 2021].
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVWG). (2018) *Power-to-X-Kraftstoffe: Vergleichende Bewertung von PtX-Prozessen zur Bereitstellung von Kraftstoffen aus erneuerbaren Quellen*. Disponível em: <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsbericht-g-201603> [Acessado em 21 abr. 2021].
- Dias, M. O. S., Maciel Filho, R., Mantelatto, P. E., Cavalett, O., Rossell, C. E. V., Bonomi, A. & Leal, M. V. (2015) Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. *Environmental Development*. 15, 35-51.
- Ebner, J. A. (2018) *Options for the production of sustainable synthetic aviation fuel*. Brasília: Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2018) Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados: segmento celulose e papel. EPE.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2021) *SIenergia: Sistema de Informação para Energia Integrado e Interativo*. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/sienergia>. [Acessado em 18 fev. 2020].
- Eurostat. (2019) *Energy, transport and environmental statistics*. Luxembourg, Publications Office of the European Union.
- Evidence and Lessons from Latin America (ELLA) (n.d.) From manual to mechanical harvesting: Reducing environmental impacts and increasing cogeneration potential. ELLA Policy Brief: Brazil's Ethanol Programme.
- Faubert, P., Barnabe, S., Bouchard, S., Côté, R. & Villeneuve, C. (2016) Pulp and paper mill sludge management practices: What are the challenges to assess the impacts on greenhouse gas emissions? *Resources, Conservation and Recycling*. 108, 107-133.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021) *Yearly statistics*. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> [Acessado em 2 jan. 2020].
- Forster-Carneiro, T., Berni, M. D., Doriello, I. L., Rostagno, M. A. (2013) Biorefinery study of availability of agricultural residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*. 77, 78-88.
- Fritsche, U. R., Iriarte, L. & Ugarte, S. (2016) Towards advanced biofuels – Options for integrating conventional and advanced biofuel production sites (RES -T-Bioplant). Munich, IEA-RETD.
- Fu, Q., Mabilat, C., Zahid, M., Brisse, A., Gautier, L. (2010) Syngas production via high-temperature steam/CO₂ co-electrolysis: an economic assessment. *Energy and Environmental Science*, 10.

- Garcia, B. B., Lourinho, G., Brito, P., & Romano, P. (2019) Review of biofuel technologies in WtL and WtE. In: Biernat, K. (ed.) *Elements of bioeconomy*. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/elements-of-bioeconomy/review-of-biofuel-technologies-in-wtl-and-wte> [Acessado em 21 abr. 2021].
- Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH India. (2018) Improving energy efficiency in iron and steel sector (achievements and way forward). GIZ.
- Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH and Ministry of Science, Technology, Innovation and Communication (MCTIC). (2019) Auf den Flügeln der Nachhaltigkeit. *Full Energy Journal*.
- Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2020) *Climate neutral alternative fuels; Project ProQR*. Disponível em: <https://www.giz.de/en/worldwide/63299.html> [Acessado em 5 abr. 2020].
- Gonçalves, R. V., Vono, L. L. R., Wojcieszak, R., Dias, C. S. B., Wender, H., Teixeira-Neto, E. & Rossi, L. M. (2017) Selective hydrogenation of CO₂ into CO on a highly dispersed nickel catalyst obtained by magnetron sputtering deposition: A step towards liquid fuels. *Applied Catalysis B: Environmental*. 209, 240-246.
- He, Q., McNutt, J. & Yang, J. (2017) Utilization of the residual glycerol from biodiesel production for renewable energy generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 71, 63-76.
- Hora, A. B. da. (2017) *Panoramas setoriais 2030: papel e celulose*. Rio de Janeiro, BNDES.
- Hora, A., Nader, L., Mendes, R. (2017). Visão 2035: Brasil, país desenvolvido. Agendas setoriais para o desenvolvimento Papel e Celulose. Rio de Janeiro: BNDES.
- IEAGHG. (2017) *CCS Deployment in the context of regional developments in meeting long-term climate change objectives*. Disponível em: <https://ieaghg.org/publications/technical-reports/reports-list/9-technical-reports/812-2017-07-ccs-deployment-in-the-context-of-regional-developments-in-meeting-long-term-climate-change-objectives> [Acessado em 22 abr. 2021].
- Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). (2019) *Relatório 2019*. São Paulo, Ibá.
- Instituto Aço Brasil (IABr). (2019) *Anuário estatístico 2019*. Rio de Janeiro, IAB.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2019) *Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – LSPA*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html?=&t=o-que-e> [Acessado em 21 dez. 2019].
- International Energy Agency (IEA). (2018) *Technology roadmap – Low-carbon transition in the cement industry*. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry> [Acessado em 22 abr. 2021].

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2005) *IPCC special report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/technical-summary/ts-03/> [Acessado em 24 mar. 2020].
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019) Annex global warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V. et al. (eds.)]. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_Low_Res.pdf [Acessado em 21 abr. 2021].
- International Air Transport Association (IATA). (2021) *Climate protection plan: Three targets and four pillars*. Disponível em: <https://www.iata.org/en/policy/environment/climate-change/> [Acessado em 21 abr. 2021].
- International Association of Oil and Gas Producers (IOGP). (2019) *The potential for CCS and CCU in Europe: Report to the thirty second meeting of the European Gas Regulatory Forum*. Disponível em: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/iogp_-_report_-_ccs_ccu.pdf [Acessado em 21 abr. 2020].
- Isaksson, J. (2015) Biomass gasification-based biorefineries in pulp and paper mills – Greenhouse Gas Emission implications and economic performance. Tese. Chalmers University of Technology.
- Ispatguru. (2015). *Understanding sinter and sinter plant operations*. Disponível em: <https://www.ispatguru.com/understanding-sinter-and-sinter-plant-operations/#:~:text=Understanding%20Sinter%20and%20Sinter%20Plant%20Operations%20Sintering%20is,combustion%20of%20solid%20fuel%20within%20the%20mass%20itself> [Acessado em 3 maio 2021].
- Karlsruhe Institute of Technology (KIT). (2020) *Bioliq-Concept*. Disponível em: <https://www.bioliq.de/index.php> [Acessado em 3 abr. 2020].
- Ketzer, J. M. M.; Machado, C. X.; Rockett, G. C.; Iglesias, R. S. (orgs.). (2014) *Brazilian atlas of CO₂ capture and geological storage*. Porto Alegre: EDIPUCRS.
- Kosov, V. F., Lavrenov, V. A., Zaichenko, V. M. (2015) Simulation of a process for the two-stage thermal conversion of biomass into synthesis gas. *Journal of Physics: Conference Series*. 653(1).
- Kuparinen, K. & Vakkilainen, E. (2017) Green pulp mill: Renewable alternatives to fossil fuels in lime kiln operations. *BioResources*. 12(2), 4031-4048
- Kuparinen, K., Vakkilainen, E., & Tynjälä, T. (2019) Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills. *Mitigation and Adaption Strategies for Global Change*. 24, 1213-1230.

- Lago, A. C., Bonomi, A., Cavalett, O., Cunha, M. P. da & Lima, M. A. (2012) Sugarcane as a carbon source: The Brazilian case. *Biomass and Bioenergy*. 46, 5-12.
- Lamsal, K., Jones, P. C. & Thomas, Barrett W. (2013) *Sugarcane harvest logistics in Brazil*. The University of Iowa's Institutional Repository.
- Larson, E. (2004) Biomass gasification systems for electric power, cogeneration, liquid fuels, and hydrogen. In: *GCEP Biomass Energy Workshop, Stanford University, 27 April 2004*.
- Lenartsson, P. R., Erlandsson, P. & Taherzadeh, M. (2014) Integration of the first and second generation bioethanol processes and the importance of by-products. *Bioresource Technology*. 165, 3-8.
- Leoneti, A. B., Aragão-Leoneti, V. & Borges de Oliveira, S. V. W. (2012) Glycerol as a by-product of biodiesel production in Brazil: alternatives for the use of unrefined glycerol. *Renewable Energy*. 45, 138-145.
- Löchle, D. (2019) Untersuchung zum Schließen des Kohlenstoffkreislaufs der brasilianischen Luftfahrt. Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Mata, T. M. & Martins, A. A. (2010) Biodiesel production processes. In: Delgado, J. M. P. Q. *Current trends in chemical engineering*. Porto, Studium, pp. 314-343.
- McCabe, W. L., Smith, J. C. & Harriott, P. (1993) *Unit operations of chemical engineering*. 5 ed. Boston, McGraw-Hill.
- Mladenov, M. & Pelovski, Y. (2010). *Utilization of wastes from pulp and paper industry*. Bulgaria, University of Chemical Technology and Methalogy.
- Mohammad, A. M. & Hilal, N. N. (2010) Re-using the by-product of cement industry (cement klein dist) to produce the concrete. *Anbar Journal for Engineering Sciences*. 3(2).
- Nda-Umar, U. I., Ramli, I., Taufiq-Yap, Y. H. & Muhamad, E. N. (2019) An overview of recent research in the conversion of glycerol into biofuels, fuel additives and other bio-based chemicals. *Catalysts*. 9(1), 15.
- Oliveira, C. C. N., Szklo, A. & Rochedo, P. (2016) Evaluation of carbon capture potential in the Brazilian cement sector. *Applied Mechanics and Materials*, 830, 46-53.
- Onarheim, K., Santos, S., Kangas, P. & Hankalin, V. (2018) Potential for Bio-CCS in the pulp and paper industry. In: VTT Technical Research Centre of Finland LTD. *Workshop Brussels, 16 January 2018*.
- Patricio, J., Angelis-Dimakis, A., Castillo-Castillo, A., Kalmykova, Y., Rosado, L. (2017) Method to identify opportunities for CCU at regional level – Matching sources and receivers. *Journal of CO2 Utilization*. 22, 330-345.
- Penna, P. C. (2019) *A indústria do cimento*. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP), Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC).

- Plácido J. & Capareda S. (2016) Conversion of residues and by-products from the biodiesel industry into value-added products. *Bioresources and Bioprocessing*. 3(23)
- Portugal, J., Rathmann, R., Soria, R., Schaeffer, R., Szklo, A. S. (2014) Techno-economic and environmental assessment of agricultural and agro-industrial waste to energy potential in Brazil. In: *5th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorization*.
- Psarras, P., Comello, S., Bains, P., Charoensawadpong, P., Reichelstein, S. & Wilcox, J. (2017). Carbon capture and utilization in the industrial sector. *Environmental Science & Technology*. 51(19), 11440-11449.
- Quispe, C. A. G., Coronado, C. J. R. & Carvalho Jr., J. A. (2013) Glycerol: production, consumption, prices, characterization and new trends in combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 27, 475-493.
- REN21 Renewables Now. (2019) *Renewables 2019: Global Status Report*. Disponível em: <https://www.ren21.net/gsr-2019/> [Acessado em 22 abr. 2021].
- Resolução 778 da Agência do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2019/abril&item=ranp-778-2019> [Acessado em 8 abr. 2020].
- Restrepo-Valencia, S. & Walter, A. (2019) Techno-Economic Assessment of Bio-Energy with Carbon Capture and Storage systems in a Typical Sugarcane Mill in Brazil. Universidade de Campinas (Unicamp).
- Rostrup-Nielsen, J. R. (2000) New aspects of syngas production and use. *Catalysis Today*. 63(2-4), 159-164.
- Roth, S., Zetterberg, L., AcWorth, W., Kangas, H.-L., Neuhoﬀ, K. & Zipperer, V. (2016) The pulp and paper overview paper: Sector analysis for the Climate Strategies Project on Inclusion of Consumption in Carbon Pricing. London, Climate Strategies.
- Sadh, P. K., Duhan, S. & Duhan, J. S. (2018) Agro-industrial waste and their utilization using solid state fermentation: a review. *Bioresources and Bioprocessing*. 5(1).
- Sampaio, I., Cardoso, T. F., Souza, N., Watanabe, M., Carvalho, D., Bonomi, A. & Junqueira, T. L. (2019) Electricity production from sugarcane straw recovered through bale system: Assessment of retrofit projects. *Bioenergy Research*. 12, 865-877.
- Santibáñez, C. & Varnero, M. T. (2014) Evaluation of chañar seed cake from biodiesel production as a soil amendment. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 14(1).
- Sarkar, S. & Mazumder, D. (2015) Solid wastes generation in steel industry and their recycling potential. In: Millenium Institute of Energy & Environment Management (org.) *Management & utilisation of wastes from metal processing industries and thermal power stations*. pp. 1-14.

- SEEG Brasil. (2018) *Greenhouse Gas Emissions Estimation System – 2018*. Disponível em: <http://seeg.eco.br/en/> [Acessado em 12 fev. 2020].
- Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). (2013) *Relatório anual 2013*. Rio de Janeiro.
- Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). (2018) *Números da indústria*. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php> [Acessado em 10 fev. 2020].
- Skoulou, V. K. & Zabaniotou, A. A. (2013) Co-gasification of crude glycerol with lignocellulosic biomass for enhanced syngas production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 99, 110-116.
- Soares, R. R., Simonetti, D. A. & Dumesic, J. A. (2006) Glycerol as a source for fuels and chemicals by low-temperature catalytic processing. *Angewandte Chemie*. 45(24), 3982-3985.
- Sricharoenchaikul, V. & Atong, D. (2012) Fuel gas generation from thermochemical conversion of crude glycerol mixed with biomass wastes. *Energy Procedia*. 14, 1286-1291.
- Thiagarajan, J., Srividya, P. K. & Balasurbramanian, P. (2018) Thermal kinetics and syngas production and co-gasification of deoiled Jatropha seed cake residues with wood chips. *International Journal of Renewable Energy Research*. 8(2).
- Tomosiunas, A., Gimzauskaite, D., Uscila, R. & Aikas, M. (2019) Thermal arc plasma gasification of waste glycerol to syngas. *Applied Energy*. 251, 113306.
- Tran, H. & Vakkilainen, E. (2007) *Advances in the kraft chemical recovery process*. Toronto, University of Toronto.
- Vasudevan, P. T. & Fu, B. (2010) Environmentally sustainable biofuels: advances in biodiesel research. *Waste and Biomass Valorization*. 1, 47-63.
- Visedo, G. & Pecchio, M. (coords.) (2019) *Roadmap tecnológico do cimento: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050*. Rio de Janeiro: SNIC.
- von der Assen, N., Müller, L., Steingrupe, A., Voll, P. & Bardow, A. (2016) Selecting CO₂ sources for CO₂ utilization by environmental-merit-order curves. *Environmental Science & Technology*. 50(3), 1093-1101.
- Wang, Y., Liu, T., Lei, L., & Chen, F. (2016) High temperature solid oxide H₂O/CO₂ co-electrolysis for syngas production. *Fuel Processing Technology Journal*. 161, 248-258.
- Wang, Y., Winans, K., Shao, Y., Whalen, J. & Matovic, D. (2014) *Life cycle assessment of biomass integrated gasification combined cycle in cement industry*. Montreal: McGill University.
- Wei, L., Pordesimo, L. O., Haryanto, A. & Wooten, J. (2011) Co-gasification of hardwood chips and crude glycerol in a pilot scale downdraft gasifier. *Bioresource Technology*. 102(10), 6266-6272.

- Welfle, A. (2017) Balancing growing global bioenergy resource demands – Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. *Biomass and Bioenergy*. 105, 83-95.
- Worldsteel Association. (2016). *Fact sheet: Steel and raw materials*. Disponível em: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:16ad9bcd-dbf5-449f-b42c-b220952767bf/fact_raw%2520materials_2019.pdf [Acessado em 22 abr. 2021].
- Yoon, S. J., Choi, Y.-C., Son, Y.-I., Lee, S.-H. & Lee, J.-G. (2010) Gasification of biodiesel by-product with air or oxygen to make syngas. *Bioresour Technology*. 101(4), 1227-1232.
- Yoon, S. J., Yun, Y. M., Seo, M. W. (2013) Hydrogen and syngas production from glycerol through microwave plasma gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*. 38(34), 14559-14567.

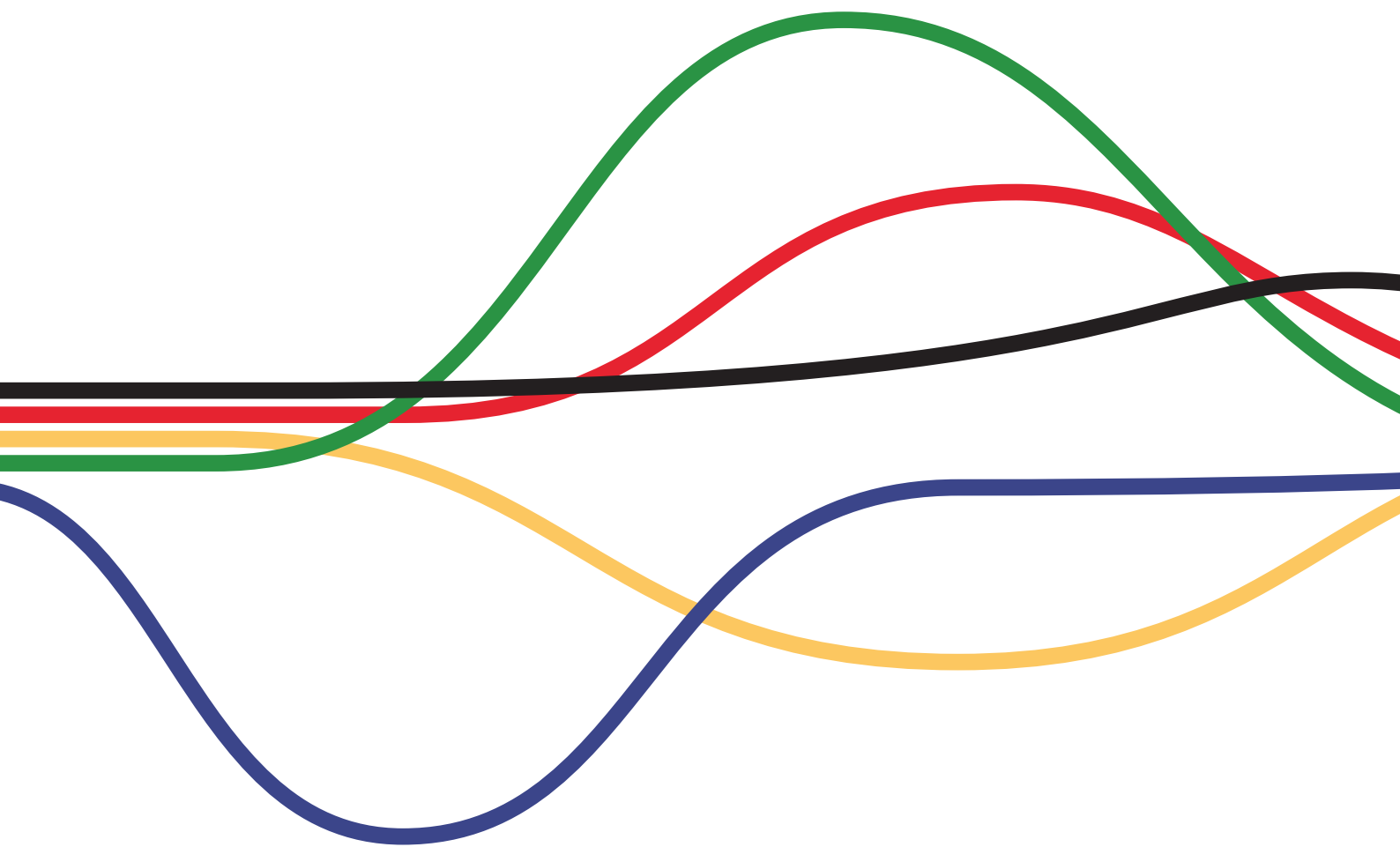
7. Anexo

Tabela 1. Fatores de conversão para diferentes resíduos industriais

Indústria	Resíduo	Fator de conversão	Fonte
Biodiesel	Glicerol	0,0984	ANP (2019)
	Torta de sementes	2,5–3	Santibáñez & Varnero (2014)
	Efluentes	0,2–1,2	Plácido & Capareda (2016)
Cimento	CO ₂	0,55	Visedo e Pecchio (2019)
Ferro e aço	CO ₂	1,9/1,56 (BF)	CNI (2017)
Papel e celulose	Cascas e resíduos de madeira	0,15	Kuparinen & Vakkilainen (2017)
	Licor negro	1,7–1,8	IEAGHG (2017)
	Lodo de papel e celulose	0,05	Cho et al. (2017)
	CO ₂	1,6–2,4	Kuparinen et al. (2019)
Etanol	Bagaço de cana-de-açúcar	0,28 0,22 DR: 10%	Restrepo-Valencia e Walter (2019) Carvalho et al. (2019) Portugal et al. (2014)
	Torta de filtro	0,02 DR: 10%	Carvalho et al. (2019)
	CO ₂	0,76 0,78	IPCC (2005) Restrepo-Valencia e Walter (2019)
Resíduos agrícolas de colheita	Palha de cana	0,22 0,14 DR: 40% 0,22 DR: 65%	Forster-Carneiro et al. (2013) EPE (2021) Carvalho et al. (2019)
	Palha de soja	2,05 1,68 DR: 30% 2,01	Forster-Carneiro et al. (2013) EPE (2021) Carvalho et al. (2019)
	Palha de milho	1,42 1,98 DR: 40% 1,53 DR: 100%	Forster-Carneiro et al. (2013) EPE (2021) Carvalho et al. (2019)
	Palha e casca de arroz	1,49 1,50 DR: 40%	Forster-Carneiro et al. (2013) EPE (2021)
		1,54 DR: 100% Palha 0,26 DR: 30% Cascas	Carvalho et al. (2019)
Resíduos agrícolas animais	Aves	1,58 0,04	Forster-Carneiro et al. (2013) EPE (2021) (esterco de pássaro)
	Bovinos	0,07 5,47	Forster-Carneiro et al. (2013) EPE (2021) (esterco de gado)
	Suínos	0,06 0,91	Forster-Carneiro et al. (2013) EPE (2021) (esterco suíno)

Tabela 2. LHVs de diferentes resíduos

Cultura	Resíduo	LHV (MJ/kg)
Cana-de-açúcar	Palha	18,62
	Bagaço	19,81
Soja	Palha	20,09
Milho	Palha	18,67
Madeira	Cavacos (eucalipto)	20,26
	Cavacos (pinus)	21,81
Arroz	Palha	17,22
	Cascas	17,08



Por ordem do



Ministério Federal
do Meio Ambiente, Proteção da Natureza
e Segurança Nuclear

Por meio da:

giz

Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



SECRETARIA DE
EMPREENDEDORISMO
E INOVAÇÃO

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



**PÁTRIA AMADA
BRASIL**
GOVERNO FEDERAL