

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL
BRASIL BIOMASSA CONSULTORIA ENGENHARIA TECNOLOGIA

ESTUDO SETORIAL DESCARBONIZAÇÃO INDÚSTRIA ALUMÍNIO

2025

E
D
I
T
O
R
A

B
R
A
S
I
L

B
I
O
M
A
S
S
A



BIOMASSA SUSTENTÁVEL HIDROGÊNIO
BIOCARVÃO ARMAZENAMENTO CARBONO
CENÁRIO NETZERO DESCARBONIZAÇÃO

SUMÁRIO EXECUTIVO

ESTUDO SETORIAL DESCARBONIZAÇÃO INDUSTRIAL ALUMÍNIO

BIOMASSA COM CAPTURA E ARMAZENAMENTO CARBONO – BIOCHAR/BIOCARVÃO ENERGÉTICO BIOGÁS/BIOMETANO – HIDROGÊNIO VERDE BAIXO CARBONO

I. Declarações Prospectivas.....26

II. Diretrizes Gerais do Estudo Setorial de Descarbonização das Indústrias
de Alumínio.....28

Capítulo 1 Descarbonização Industrial Processo Produção Alumínio52

Seção 1 Mercado Internacional de Alumínio.....52

1.1. Mercado Mundial de Alumínio

1.1.1. Tendência do Mercado de Alumínio

1.1.2. Fatores de Crescimento do Mercado de Alumínio

1.1.2.1. Aumento da Demanda no Setor de Transportes

1.1.3. Fatores de Restrição do Aumento de Mercado

1.1.4. Diretrizes Gerais do Mercado de Alumínio

1.1.5. Percepções Regionais de Mercado

1.1.5.1. Tamanho do mercado de alumínio da Ásia Pacífico

1.1.5.2. Tamanho do mercado de alumínio da União Europeia

1.1.5.3. Tamanho do mercado de alumínio da América do Norte

1.1.5.4. Tamanho do mercado de alumínio da América Latina.

1.1.5.5. Tamanho do mercado de alumínio do Oriente Médio e África

1.1.6. Principais Desenvolvimento da Indústria de Alumínio

Seção 2 Mercado Brasileiro de Alumínio.....70

1.2. Indústria Brasileira de Alumínio

1.2.1. Tamanho e perspectivas do mercado de produção de alumínio no Brasil

1.2.2. Perspectivas do Mercado de Alumínio no Brasil

1.2.3. Crescimento do mercado de alumínio no Brasil

1.2.4. Participação no Mercado de Alumínio no Brasil

1.2.5. Macrolocalização e Quantitativo de empresas do setor industrial de Alumínio no Brasil

1.2.5.1. Macrolocalização e Quantitativo de empresas setor industrial de Alumínio por Estados no Brasil

1.2.5.2. Macrolocalização e Quantitativo de empresas setor industrial de Alumínio maiores municípios no Brasil

1.2.5.3. Porte empresarial das empresas do setor industrial de Alumínio no Brasil

Seção 3 Cadeia Produtiva de Alumínio.....77

1.3. Características Gerais do Alumínio

1.4. Descrição da cadeia produtiva

1.5 Obtenção do alumínio primário

1.5.1. Mineração

1.5.2. Refinaria

1.5.3 Redução

Seção 4 Propriedades do Alumínio.....81

1.6 Características Físicas e Químicas do Alumínio

1.6.1 Propriedades Mecânicas

1.6.2 Limite de resistência à tração

1.6.3 Limite de escoamento

1.6.4 Alongamento

1.6.5 Dureza

1.6.6 Módulo de elasticidade

1.6.7 Tensão de fadiga

1.6.8 Temperaturas elevadas

1.6.9 Temperaturas baixas

1.7 Aplicações do Alumínio

1.8 Qualidades do alumínio

Seção 5 Processo Industrial de Produção Alumínio.....89

1.9. Processo Geral de Produção de Alumínio (Laminação, Estampagem, Extrusão por Impacto, Forjamento, Fundição, Soldagem, Usinagem e Reciclagem)

1.10. Processo Industrial de Produção de Alumínio

1.10.1 Produção de alumina

1.10.2 Produção de alumínio primário

1.10.2.1 Ânodos de carbono

1.10.2.2 Materiais eletrolíticos

1.10.2.3 Materiais catódicos

1.10.2.4 Eficiência elétrica

1.10.2.5 Gases perfluorocarbonados

1.10.3 Produção de alumínio secundário

1.10.3.1 Nova sucata

1.10.3.2 Sucata pós-consumo

1.10.3.3 Reciclagem de alumínio

Seção 6 Consumo Energético Produção Industrial Alumínio132

1.11. Produção e Consumo Energético

1.11.1. Mineração

1.11.2. Processo de produção de alumínio

1.11.3. Processo convencional

1.11.3.1. Reverberatório

1.11.3.2. Fornos de torre

Seção 7 Emissões CO2 Processo Industrial de Alumínio.....137

1.12. Emissões CO2 Indústrias de Alumínio

1.12.1. Eletrificação do setor industrial de Alumínio.

1.12.2. Forno de indução sem núcleo

1.12.3. Indução de disparo único

Seção 8 Novas Tecnologias de Descarbornização Indústria Alumínio.....140

- 1.13. Descarbonização das emissões indiretas
 - 1.13.1. Descarbonização das emissões diretas
 - 1.13.2. Ânodos inertes
 - 1.13.3. Uso de hidrogênio
 - 1.13.4. Eletrificação direta
 - 1.13.5. Outras melhorias de processo
 - 1.13.5.1. Recuperação de calor residual
 - 1.13.5.2. Digestão em baixa temperatura
 - 1.13.5.3. Calcinadores de leito fluidizado
 - 1.13.5.4. Caldeiras elétricas para processos de baixa e média temperatura
 - 1.13.5.5. Recompressão mecânica de vapor
 - 1.13.5.6. Redução carbotérmica de alumina
 - 1.13.5.7. Temperatura de eletrólise mais baixa
 - 1.13.5.8. Novas tecnologias de fundição
 - 1.13.6. Eficiência de recursos
 - 1.13.7. Impulsionar a descarbonização
- 1.14. Bioeletricidade Biomassa para Descarbonização Indústrias de Alumínio
- 1.15. Fontes de energia de baixo carbono, Biomassa, Hidrogênio ou Bioeletricidade
- 1.16. Descarbonização dos processos de fundição de alumínio.
- 1.17. Opções para Produzir Alumínio mais verde.

Capítulo 2 Estratégias Fundamentais Descarbonização Industrial.....	177
Seção 1 Combustíveis Fósseis na Produção Alumínio.....	177
2.1. Diretrizes Gerais dos Problemas Climáticos	
2.1.1. Uso Excessivo Combustíveis Fósseis	
2.1.1.1. Óleo ou petróleo bruto	
2.1.1.2. Carvão Mineral	
2.1.1.3. Gás fraturado (natural)	
2.1.1.4. Desvantagens dos combustíveis fósseis	
2.1.1.4.1. Degradação da terra	
2.1.1.4.2. Poluição da água	
2.1.1.4.3. Emissões	
2.1.1.4.4. Queima de combustíveis fósseis e a poluição do aquecimento global	
2.1.1.4.5. Outras formas de poluição do ar	
2.1.1.4.6. Acidificação dos oceanos	
2.1.1.4.7. Construindo um futuro de energia	
2.1.2 Acabar Dependência dos Combustíveis Fósseis	
2.1.2.1. Maior eficiência energética	
Seção 2 Agenda Climática e Descarbonização.....	192
2.1.3. Acordos Internacionais sobre Mudanças Climáticas e Descarbonização Industrial com a Redução de Consumo dos Combustíveis Fósseis.	
2.1.3.1 Acordo de Paris e a Descarbonização Industrial	
2.1.3.2 COP 26 e Descarbonização Industrial pela Biomassa	

2.1.3.3 Plataforma First Movers Coalition e Iniciativa de Descarbonização Industrial Profunda.

2.1.3.4 Agenda Climática Brasileira

2.1.3.5 Declaração de Glasgow e Bioenergia Sustentável

2.1.3.6. Participação do Setor Industrial nas Emissões Globais de Gases de Efeito Estufa

2.1.3.7. COP 28 e Descarbonização Industrial

2.1.4. Tecnologias de Remoção de Gases de Efeito Estufa

Seção 3 Descarbonização Industrial.....212

2.2. Descarbonização Industrial

2.2.1. Descarbonização global

2.2.2. Visão Geral Mundial da Descarbonização industrial

2.2.3. Meta de descarbonização para atingir o Net Zero até 2050

2.2.4. Necessidade fundamental da descarbonização

2.2.4.1. Setores Industriais Intensivos em Energia

2.2.5. Papel das indústrias na descarbonização.

2.2.6. Soluções para redução CO2 no setor industrial

2.2.7. Tecnologias de descarbonização.

2.2.7.1. Energias Renováveis.

2.2.7.2. Energias fósseis de baixo carbono

2.2.7.3. Hidrogênio

Seção 4 Roteiro de Descarbonização Industrial.....226

2.2.8. Roteiro de Descarbonização Industrial	
2.2.9. Descarbonização, Redução do dióxido de carbono e Estratégia Energética	
2.2.10. Descarbonização e soluções de remoção	
2.2.11. Benefícios da descarbonização para as empresas	
2.2.12. Momento de descarbonização industrial	
2.2.13. Maiores desafios da descarbonização	
2.2.14. Descarbonizar a rede energética	
2.2.15. Combustíveis de baixo carbono	
2.2.16. Descarbonização absoluta vs. descarbonização de intensidade	
2.2.17. Futuro da descarbonização	
2.2.18. Descarbonização e Net Zero	
Seção 5 Estratégias Fundamentais de Descarbonização Industrial.....	242
2.3. Estratégias Fundamentais de Descarbonização Industrial	
2.3.1. Estratégia de Combustível Industrial de Baixo Carbono.	
2.3.2. Estratégia da Biomassa Sustentável para Descarbonização Industrial	
2.3.3. Estratégia de Segurança Energética	
2.3.4. Estratégia Zero Carbono no Sistema de Transporte	
2.3.5. Estratégia Hidrogênio Verde	
2.3.6. Estratégia de Descarbonização dos Edifícios Industriais	
Seção 6 Biomassa para Descarbonização Industrial	246
2.4. Biomassa para Reduções Emissões CO2	

- 2.4.1. Descarbonização Industrial com Uso da Biomassa
- 2.4.2. Desafios do uso da Biomassa para Descarbonização Industrial
- 2.4.3. Disponibilidade de Biomassa Brasil
- 2.4.4. Projeções de Disponibilidade de Biomassa no curto prazo (2025-2030)
- 2.4.5. Projeções de Disponibilidade de Biomassa no Médio Prazo (2030-2040)
- 2.4.6. Projeções de Disponibilidade de Biomassa no Longo Prazo (2040/2050)
- 2.4.7. Emissões Líquidas zero
- 2.4.8. Cenário 2050: Alta Eletrificação
- 2.4.9. Cenário 2050: Alto Recurso
- 2.4.10. Cenário 2050 : Alta inovação
- 2.4.11. Descarbonização de Substituição Gás Natural GLP por Biomassa
 - 2.4.11.1. Diretrizes Gerais do Gás natural
- 2.4.12. Eficiência Energética
- 2.4.13. Troca de Combustível na Matriz Energética
 - 2.4.13.1. Abordagens Disponíveis para a Descarbonização da Indústria.
 - 2.4.13.2. Troca de Combustível e Eletrificação com uso da Biomassa
- 2.4.14. Descarbonização Industrial e a Economia Circular

Capítulo 3 Descarbonização Industrial Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono.....268

- 3.1. Introdução
 - 3.1.1. Definição técnica.
 - 3.1.2. Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono

- 3.1.3. Importância do BECCS para as indústrias alcançarem meta zero carbono
- 3.1.4. Cenário de projeção
- 3.1.5. Processo de Emissão Negativa
- 3.1.6. Conversão da Biomassa
- 3.1.7. Opções Tecnológicas para Remoção de CO₂
- 3.1.8. Tecnologia como Captura Pós-combustão
- 3.1.9. Captura e Armazenamento Direto de Carbono no Ar.
- 3.1.10. Tecnologias Captura e Armazenamento de Carbono de Bioenergia
 - 3.1.10.1. Conversão de Biomassa.
 - 3.1.10.2. Tecnologias Avançadas de Conversão.
 - 3.1.10.3. Tecnologias de Captura de CO₂
 - 3.1.10.4. Captura Pós-combustão.
 - 3.1.10.5. Captura de Oxi-combustão
 - 3.1.10.6. Captura Pré-combustão
- 3.1.11. Emissões de CO₂ da produção e transporte de biomassa
 - 3.1.11.1. Captura de CO₂ de Emissões Industriais.
 - 3.1.11.2. Captura de CO₂ durante o processo
- 3.1.12. Opções Tecnológicas Atuais e Futuras
 - 3.1.12.1. Tecnologias em desenvolvimento de captura de CO₂
- 3.1.13. Transporte de CO₂
- 3.1.14. Armazenamento de CO₂
- 3.1.15. Utilização de CO₂
- 3.1.16. Logística e Contabilidade de Carbono.

- 3.1.17. Modelo de Controle Ambiental Integrado
- 3.1.18. Custos de Carbono
- 3.1.19 Custo do Carbono Armazenado
- 3.1.20. Custo do Carbono Evitado
- 3.1.21. Análise Econômica
- 3.1.22. Iniciativas Atuas da Tecnologia BECCS.
- 3.1.23. Desafios e Impactos da Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono
- 3.1.24. Desafios e Barreiras para a Implantação da Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono
- 3.1.25. Benefícios e Impactos da Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono.

Capítulo 4 Descarbonização Industrial Biocarvão/Biocarbono.....328

- 4.1 Processos de conversão térmica
- 4.2 Pirólise
 - 4.2.1. Pirólise Lenta
- 4.3 Pirólise Rápida
 - 4.3.1 Reatores para a pirólise rápida
 - 4.3.1.1 Reator de leito fluidizado
 - 4.3.1.2 Leito fluidizado circulante
 - 4.3.1.3 Pirolisador de cone rotativo
 - 4.3.1.4 Reator ablativo
 - 4.3.1.5 Reator rosca sem fim
 - 4.3.2 Rendimentos de bio-óleo em reatores de pirólise rápida

- 4.4. Pirólise rápida de biomassa em reator de leito fluidizado
 - 4.4.1 Fluidodinâmica do leito fluidizado
 - 4.4.1.1 Influência das propriedades das partículas
 - 4.4.1.2 Regimes de fluidização
 - 4.4.1.3 Slugging e tendência de agregação das partículas
 - 4.4.1.4 Qualidade da fluidização
 - 4.4.1.5 Mistura e segregação de misturas binárias
 - 4.4.1.6 Algumas correlações para a previsão da velocidade de mínima fluidização
 - 4.4.2 Reatores de leito fluidizado aplicados à pirólise rápida
 - 4.4.3 Reações secundárias em reatores de leito fluidizado
 - 4.4.3.1 Mecanismos de reações na pirólise rápida
- 4.5. Produtos da pirólise rápida
 - 4.5.1. Bio-óleo
 - 4.5.1.1. Propriedades do bio-óleo
 - 4.5.1.2 Características do bio-óleo
 - 4.5.1.3 Teor de água no bio-óleo
 - 4.5.1.4 Densidade do bio-óleo
 - 4.5.1.5 Teor de sólidos
 - 4.5.1.6 Teor de oxigênio
 - 4.5.1.7 Poder calorífico
 - 4.5.2 Aplicações do bio-óleo
 - 4.5.3 Upgrading do bio-óleo
 - 4.5.4. Gases da carbonização

4.5.4.1. Gás natural sintético

4.6. Biocarvão/Biocarbono

4.6.1. Aspectos gerais de produção do biocarbono

4.6.1.1. Tecnologia biogreen

4.6.1.1.1. Propriedades reológicas e características de fluxo da matéria-prima

4.6.1.1.2. Sistema industrial

4.6.1.1.3. Sistema de secagem

4.6.1.1.4. Sistema de pirólise

4.6.1.1.5. Câmara de pirólise

4.6.1.1.6. Sistema de refrigeração

4.6.1.1.7. Sistema de transporte

4.6.1.2. Tecnologia de Pirólise em Contêineres

Capítulo 5 Descarbonização Industrial Biometano/Gás Natural Verde.....384

5.1. Biogás

5.2. Crescimento e Tendências do Mercado de Biogás

5.2.1. Fatores de Crescimento do Mercado de Biogás

5.2.2. Fatores de Restrição de Mercado

5.3. Tendências do Mercado Internacional de Biogás

5.3.1. Mercado de Biogás dos Estados Unidos

5.3.2. Mercado Europeu de Biogás.

5.3.3. Mercado Ásia-Pacífico de Biogás

5.4. Dinâmica de Mercado de Biogás.

5.5. Biogás e Mercado de Energia

- 5.6. Principais empresas de participação de mercado
- 5.7. Mercado Brasileiro de Biogás
- 5.8. Diretrizes Gerais de Produção de Biogás
 - 5.8.1. Etapas de Formação do Biogás.
 - 5.8.2. Uso Energético do Biogás
 - 5.8.3. Rendimento do Biogás
 - 5.8.4. Tecnologia de Produção de Biogás
 - 5.8.5. Digestão Anaeróbica.
 - 5.8.6. Limpeza de Biogás
 - 5.8.7. Atualização de Biogás
 - 5.8.8. Tipos de Substratos
 - 5.8.9. Logística e Avaliação dos Substratos
- 5.9. Biometano
 - 5.9.1. Benefícios do Biometano
 - 5.9.2. Usos do Biometano
 - 5.9.3. Forma de Produção de Biometano
 - 5.9.4. Sustentabilidade do Biometano.
- 5.10. Mercado Mundial de Biometano
- 5.11. Sistema de Purificação de Biogás e Geração de Biometano
- 5.12. Produção Industrial de Biometano
 - 5.12.1. Melhoria do Biogás
 - 5.12.2. Gaseificação térmica de biomassa sólida seguida de metanação
- 5.13. Papel do Biometano no Caminho Zero Líquido.

- 5.14. Biometano como substituto do gás natural
- 5.15. Sistemas de biogás como um componente estratégico de uma biorrefinaria
- 5.16. Sistemas de biogás como parte da economia circular.
- 5.17. Transporte limpo com o Biometano
- 5.18. Produção CO₂ Industrial
- 5.19. Produção de Amônia Verde
- 5.20. Biometano e Ecologização da Rede (Gás Natural Verde)
- 5.21. Biometano e Captura e Armazenamento de Carbono

Capítulo 6 Descarbonização Industrial Hidrogênio Baixo Carbono.....468

- 6.1 Hidrogênio Verde
 - 6.1a. Eletrólise da água
 - 6.1b. Unidades industriais de eletrólise
 - 6.1c Eletrodos e eletrólitos utilizados na eletrólise alcalina
 - 6.1d Fontes energéticas utilizadas na geração de hidrogênio verde
 - 6.1e. Armazenamento do hidrogênio
 - 6.1f. Tanques pressurizados
 - 6.1g. Armazenamento geológico
 - 6.1h. Armazenamento de hidrogênio líquido
 - 6.1i. Hidretos metálicos
 - 6.1j. Adsorção em nanomateriais
 - 6.1k. Transportadores de hidrogênio orgânicos líquidos
 - 6.1l. Transporte de hidrogênio
 - 6.1m. Aplicações do hidrogênio

- 6.1n Motores de combustão interna
- 6.1o. Células de combustível
- 6.1.1. Diretrizes gerais do Hidrogênio Verde
 - 6.1.1.1. Características do Hidrogênio Verde
 - 6.1.1.2. Classificação e Produção do Hidrogênio Verde
 - 6.1.1.3. Armazenamento e Distribuição do Hidrogênio Verde
 - 6.1.1.4. Benefícios e Consumo do Hidrogênio Verde
 - 6.1.1.5. Potenciais Aplicações de Hidrogênio Verde
 - 6.1.1.6. Perspectivas de Custo de Produção e Distribuição do Hidrogênio Verde
- 6.1.2. Tecnologia de Produção do Hidrogênio Verde
- 6.1.3. Energia renovável para produção de hidrogênio.
 - 6.1.3.1. Energia Solar na Produção de Hidrogênio.
 - 6.1.3.2. Energia Eólica na Produção de Hidrogênio.
 - 6.1.3.3. Energia hidrelétrica na produção de hidrogênio.
 - 6.1.3.4. Biomassa na produção de hidrogênio.
- 6.1.4. Hidrogênio Verde como agente complementar
- 6.1.5. Hidrogênio Verde e Captura e Armazenamento de Carbono
- 6.1.6. Hidrogênio Verde como Combustível de Baixo Carbono

Capítulo 7 Tipos de Biomassa para Descarbonização Industrial.....518

- 7.1. Aspectos Gerais
- 7.2. Tipos de Biomassa para Descarbonização Industrial
- 7.3. Biomassa Agricultura e Beneficiamento Agroindustrial
 - 7.3.1. Produção de Biomassa Agroindustrial no Brasil

7.3.2. Principais Culturas Agrícolas - Safra de Grãos 2024/25

7.3.2.1. Cultura do Açaí Produção e Disponibilidade

7.3.2.2. Cultura do Algodão Produção e Disponibilidade

7.3.2.3. Cultura do Amendoim Produção e Disponibilidade

7.3.2.4. Cultura do Arroz Produção e Disponibilidade

7.3.2.5. Cultura do Babaçu Produção e Disponibilidade

7.3.2.6. Cultura do Cacau Produção e Disponibilidade

7.3.2.7. Cultura do Café Produção e Disponibilidade.

7.3.2.8. Cultura da Castanha do Pará Produção e Disponibilidade

7.3.2.9. Cultura da Cevada Produção e Disponibilidade

7.3.2.10. Cultura do Coco da Bahia Produção e Disponibilidade

7.3.2.11. Cultura do Feijão Produção e Disponibilidade

7.3.2.12. Cultura da Laranja Produção e Disponibilidade

7.3.2.13. Cultura da Mandioca Produção e Disponibilidade

7.3.2.14. Cultura do Milho Produção e Disponibilidade

7.3.2.15. Cultura da Soja Produção e Disponibilidade

7.3.2.16. Cultura do Trigo Produção e Disponibilidade

7.3.2.17. Cultura do Sorgo Produção e Disponibilidade

7.3.2.18. Cultura da Uva Produção e Disponibilidade

7.4. Biomassa da Cana-de-açúcar - Safra 2024/25

7.4.1 Resíduos da Cultura da Cana-de-açúcar

7.4.2 Palha da cana-de-açúcar

7.4.3 Bagaço da cana-de-açúcar

7.4.4 Água de Lavagem da Cana-de-açúcar

7.4.5 Vinhaça

7.5. Produção e Uso de Biomassa Florestal e da Madeira no Brasil

7.5.1. Recursos Florestais no Brasil

7.5.2. Setor Brasileiro de Florestas Plantadas

7.5.3. Geração de Empregos no Setor Florestal Brasileiro

7.5.4. Produção florestal em florestas plantadas

7.5.5. Produção Florestal Brasil

7.5.6. Produtos Florestais Madeireiros

7.5.7. Produtos Processados da Madeira

7.5.8. Perspectivas Futuras Biomassa para Energia

7.5.9. Disponibilidade de Biomassa Brasil

7.5.10. Produção Biomassa Brasil – Quantitativo

7.5.11. Diagnóstico de Produção e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira na Região Norte

7.5.11.1. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Acre

7.5.11.2. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Amapá

7.5.11.3. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Amazonas

7.5.11.4. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Pará

7.5.11.5. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira em Rondônia

7.5.11.6. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira em Roraima

7.5.11.7. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Tocantins

7.5.12. Diagnóstico de Produção e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira na Região Nordeste

- 7.5.12.1. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira em Alagoas
- 7.5.12.2. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira na Bahia
- 7.5.12.3. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Ceará
- 7.5.12.4. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Maranhão
- 7.5.12.5. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira na Paraíba
- 7.5.12.6. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira em Pernambuco
- 7.5.12.7. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira em Piauí
- 7.5.12.8. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Rio Grande Norte
- 7.5.12.9. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira em Sergipe
- 7.5.13. Diagnóstico de Produção e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira na Região Centro Oeste
 - 7.5.13.1. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Distrito Federal
 - 7.5.13.2. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira em Goiás
 - 7.5.13.3. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Mato Grosso
 - 7.5.13.4. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Mato Grosso Sul
- 7.5.14. Diagnóstico de Produção e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira na Região Sudeste
 - 7.5.14.1. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Espírito Santo
 - 7.5.14.2. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira em Minas Gerais

7.5.14.3. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Rio de Janeiro

7.5.14.4. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira em São Paulo

7.5.15. Diagnóstico de Produção e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira na Região Sul

7.5.15.1. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Paraná

7.5.15.2. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira no Rio Grande do Sul

7.5.15.3. Quantitativo e Disponibilidade de Biomassa Florestal e da Madeira em Santa Catarina

BRASILBIOMASSA CONSULTORIA ENGENHARIA TECNOLOGIA.....634

Estudo Setorial Descarbonização das Indústrias Alumínio – Biomassa Biocarvão
Hidrogênio Verde – Captura de Carbono

Catálogo na Fonte Brasil.

Brasil Biomassa e Energia Renovável. Curitiba. Paraná. 2025

Conteúdo: 1. Análise do Setor Industrial de Produção de Alumínio no Brasil 2. Emissões de CO2 das Indústrias Alumínio 3. Caminho e Cenários da Descarbonização e Projeções para Reduções de CO2. 4. Consumo Energético Produção Alumínio e Alternativas Energéticas para Descarbonização 5. Tecnologias para Redução das Emissões de Carbono 6. Tecnologia e Projeções de Produção de Biomassa Sustentável 7. Tecnologia e Projeções de Produção de Hidrogênio Verde 8. Tecnologia e Projeções de Produção de Captura e Armazenamento de Carbono 9. Recuperação de Calor com Tecnologias Avançadas 10. Fundamentos da Descarbonização Industrial das Indústrias de Alumínio

II. Título. CDU 621.3(81)“2030” : 338.28 CDU 620.95(81) CDD333.95 (1ed.)

Todos os direitos reservados a Brasil Biomassa e Energia Renovável

Copyright by Celso Marcelo de Oliveira

Tradução e reprodução proibidas sem a autorização expressa do autor.

Nenhuma parte deste estudo pode ser reproduzida ou transmitida de qualquer forma ou meio, incluindo fotocópia, gravação ou informação, ou por meio eletrônico, sem a permissão ou autorização por escrito do autor. Lei 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.

Edição eletrônica no Brasil e Portugal em versão eletrônica

© 2025 ABIB Brasil Biomassa e Energia Renovável

Edição 2025 Total 720 páginas.

Proibida a reprodução com ou sem fins lucrativos, parcial ou total, por qualquer meio impresso e eletrônico.

PREFÁCIO



Em nome da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e dos numerosos colaboradores no desenvolvimento do Estudo Setorial Descarbonização das Indústrias Alumínio – Biomassa Biocarvão Hidrogênio Verde – Captura de Carbono, tenho o prazer de apresentar o primeiro estudo setorial da série Descarbonização Industrial desenvolvido pela Brasil Biomassa sobre o potencial para um futuro de baixo carbono nos setores industriais mais intensivos em calor no Brasil.

As alterações climáticas apresentam-se como um dos maiores desafios para a humanidade neste século. Vivemos numa época onde somos sobrecarregados com informações sobre o impacto dos combustíveis fósseis no nosso planeta, que podem ter consequências negativas sobre a atividade humana, ao nível social, econômico e ambiental.

No entanto, mais recente é a preocupação e necessidade de descarbonização da indústria em alinhamento às metas globais de redução de gases do efeito estufa.

O setor industrial produz grandes quantias desses gases, como o dióxido de carbono, CO₂. O metano, CH₄, outro tipo de GEE, é parte dos recursos energéticos secundários e é queimado a CO₂ nas unidades. Pode-se reduzir o conceito mais amplo de pegada de carbono na indústria a uma emissão integrada de CO₂, que é a soma das emissões de CO₂, aparecendo conseqüentemente em todos os processos da cadeia tecnológica, começando com a extração de matéria prima e terminando com o produto final.

Quanto ao consumo de energia, o setor é um grande maior consumidor industrial de energia. O combustível mais usado no setor é o carvão e o gás natural. Deste modo, esta temática da descarbonização revela-se importante para a atividade industrial, cuja intervenção pode aumentar ou reduzir o seu impacto.

Para abordar esta temática constitui-se necessário analisar as alterações climáticas, no sentido de compreender as causas que levam ao aquecimento global e averiguar de que modo se constitui possível uma redução significativa das emissões de gases de efeito de estufa, impondo-se a descarbonização empresarial em vários setores da economia, em particular no setor industrial.

A descarbonização deve promover uma mudança na mentalidade e comportamento das pessoas assim como na atuação das empresas. Neste contexto, a descarbonização industrial ganha assim importância estratégica, nomeadamente em sustentabilidade e responsabilidade social para fazer face às alterações climáticas.

A sustentabilidade é tida como fator chave para a vantagem competitiva das organizações e considerada não apenas desejável, mas imperativa, num tempo marcado pelas alterações climáticas e aplicação das políticas ambientais. Este estudo setorial avalia todas as alternativas técnicas para a descarbonização industrial do setor para as reduções de emissões de CO₂, da mudança de fonte de energia para bioeletricidade com uso da biomassa e principalmente das novas e inovadoras tecnologias de biocarvão (bio-óleo e gás sintético), hidrogênio verde e captura e armazenamento de carbono para o setor industrial.

Este Estudo setorial investiga como a indústria poderá descarbonizar o processo produtivo e industrial, reduzindo as emissões de CO₂, aumentando a eficiência energética, permanecendo competitiva no mercado.

As mudanças na economia internacional e a necessidade de descarbonizar significam que as empresas do setor no Brasil, venham em enfrentar os desafios crescentes, bem como encontrar novas oportunidades. O Brasil está comprometido em mudar para uma economia de baixo carbono, incluindo os setores mais intensivos em energia. Esses setores consomem uma quantidade considerável de energia, mas também desempenham um papel essencial na entrega da transição para uma economia de baixo carbono, bem como na contribuição para o crescimento e no reequilíbrio da economia.

O Estudo setorial visa:

- Melhorar a compreensão do potencial de redução de emissões de setores industriais, os custos e desafios relativos de opções alternativas de geração e de redução do consumo de energia.
- Estabelecer uma base de evidências das novas tecnologias para descarbonização industrial do setor e para identificar conclusões estratégicas e próximos passos potenciais para ajudar a entregar uma descarbonização econômica no médio a longo prazo (durante o período de 2030 a 2050)

Portanto, cada tópico do estudo visa apresentar evidências, análises e conclusões existentes no mercado nacional e internacional para que o setor possa tomar medidas subsequentes com relação a questões como redução e eficiência energética, alternativas de reduções de GEE, descarbonização e tecnologias de biocarvão, hidrogênio e de captura e armazenamento de carbono.

Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável

DECLARAÇÕES PROSPECTIVAS

Declarações Prospectivas . Este Estudo de Setorial de descarbonização industrial contém certas declarações prospectivas que dizem respeito dos projetos e tecnologias inovadoras para descarbonização industrial. Este Estudo Setorial para descarbonização industrial contém certas declarações prospectivas que dizem respeito a eventos futuros ou desempenho futuro do mercado. Estas declarações prospectivas são baseadas em previsões e estudos técnicos e dados de mercado sobre as expectativas de desenvolvimento e de expansão do mercado de consumo de biomassa e dos projetos energéticos para descarbonização

Objetiva-se com o Estudo de mercado em gerar expectativas dentro de uma tendência de mercado e de tecnologias para descarbonização. Se as expectativas geradas e premissas revelarem-se incorretas por mudança de fatores e de mercado, então os resultados reais podem diferir materialmente da informação prospectiva contida neste documento.

Além disso, declarações prospectivas, por sua natureza, envolvem riscos e incertezas que poderiam causar os resultados reais difiram materialmente daqueles contemplados no estudo.

Assim utilizamos as declarações prospectivas de informações como apenas uma advertência no desenvolvimento do Estudo Setorial de Descarbonização.

DIRETORIA EXECUTIVA



II. Diretrizes Gerais do Estudo Setorial de Descarbonização das Indústrias de Alumínio



O alumínio é um material essencial na transição para energia limpa e será necessário para eletrificação de transporte, expansão da rede e geração de eletricidade renovável. De fato, à medida que a transição para energia limpa ganha força, a demanda global por alumínio pode mais que dobrar até 2050. No entanto, a produção de alumínio libera altas quantidades de carbono e outras emissões de gases de efeito estufa (GEE). Descarbonizar a produção de alumínio é essencial para maximizar o benefício climático do alumínio e neste sentido é de extrema importância do presente Estudo setorial.

A indústria do alumínio desempenha um papel importante na economia do Brasil, não apenas por seu valor intrínseco, mas também como um elo na cadeia de outras indústrias. Este estudo setorial fornece uma visão geral das tecnologias de descarbonização disponíveis para a indústria de alumínio para permitir que ela cumpra sua contribuição para as metas de descarbonização 2030 e 2050.

A indústria agora enfrenta a tarefa de reduzir suas emissões de CO2 para estar em linha com as metas climáticas do Brasil, ao mesmo tempo em que permanece competitiva em uma indústria globalizada. Este estudo setorial analisa o estado atual da indústria do alumínio, tanto global quanto nacionalmente, e apresenta uma visão geral das tecnologias que estão sendo desenvolvidas e adotadas para descarbonizar o setor e os efeitos potenciais de sua implementação.



A eletrificação

com a bioeletricidade eo uso da biomassa bem como cinco tecnologias-chave, são identificadas no presente estudo com o potencial de descarbonizar a indústria do alumínio. A eletrificação direta de processos é parte integrante da descarbonização, agravada pela ambição de descarbonizar a geração de eletricidade. A captura de carbono é a mais desenvolvida, à beira do preço de equilíbrio para esta indústria.

O biocarvão ou o biocarbono é uma inovação tecnológica (sendo desenvolvida pela Vale no Brasil) em termos de conversão da biomassa pelo sistema de pirólise num produto energético para geração de energia, calor e aquecimento.

O biogás e especialmente o biometano é uma solução energética para a substituição do gás natural nas indústrias de alumínio.

E finalmente o hidrogênio pode ser usado para substituir combustíveis fósseis e reduzir as emissões de CO₂ em aplicações de alta temperatura.

Âodos inertes têm o potencial de eliminar as emissões do processo de fundição enquanto aumentam a eficiência, reduzindo assim a demanda da indústria por energia.

O setor do alumínio pode se tornar neutro em carbono, mas as barreiras econômicas e tecnológicas permanecem. Uma opção é fazer mais uso da rota de produção secundária, que usa 95% menos energia, mas a economia disso depende muito da disponibilidade de sucata. Cerca de 30% do carbono global está atualmente sujeito a impostos, e essa proporção está crescendo. À medida que as tecnologias amadurecem e o preço do CO₂ aumenta, o ponto de inflexão para a descarbonização em toda a indústria está se aproximando.

Este estudo setorial visa estabelecer uma metodologia para avaliar o potencial de descarbonização do setor industrial de produção de alumínio.

Ao se concentrar neste setor específico, grande emissor de CO₂ e consumidor de energia, o estudo visa abordar detalhes específicos que seriam importantes para as reduções de emissões de CO₂ e propriamente as alternativas tecnológicas para a descarbonização do setor industrial, com dados precisos, e fornecendo uma estrutura que pode ser aplicada em todas as indústrias do setor. Especificamente, a metodologia pode ser transferida para cada tipo de indústria como as produtoras do alumínio.

A metodologia para determinar o inventário de emissões de CO₂ das indústrias de alumínio e o potencial de descarbonização pode ser dividida em duas etapas principais. Determinar a pegada de carbono de cada processo industrial analisando como ele consome energia e produz ou captura emissões. Em seguida, fornecer diferentes soluções e cenários sobre como reduzir as emissões das indústrias de alumínio dentro do escopo do estudo setorial..

Esta seção abordará o processo de coleta de dados, análise, o processo de tomada de decisão para a solução concreta e como os resultados foram obtidos, incluindo quais ferramentas foram usadas..



Retratamos no

estudo setorial que o potencial de descarbonização das indústrias de alumínio pode ser dependente de planejamento e de segurança para suprimento de energia limpa (bioeletricidade, biomassa e hidrogênio) para impulsionar a implementação de medidas específicas para redução e eficiência energética do setor.

Assim sendo uma redução substancial das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) deve ser alcançada para limitar o aumento da temperatura global bem abaixo de 2 °C, conforme estipulado na meta climática do Acordo de Paris e das COPs. Esta redução requer transformações sistêmicas fundamentais, rápidas e em larga escala para descarbonizar completamente o setor industrial de produção de alumínio. O Brasil estabeleceu ambições claras para a descarbonização, com uma meta de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em pelo menos 55% até 2030 e atingir a neutralidade climática até 2050.

Para atingir essas metas, todos os setores industriais como o de alumínio terão que encontrar maneiras de transformar seus processos em atividades sustentáveis e não emissoras.

No estudo setorial retratamos que as indústrias produtoras de alumínio têm um papel enorme em atingir essas metas, já que são responsáveis por um grande consumo de energia (origem dos combustíveis fósseis) e por ser um dos setores que emitem um grande contingente dos gases de efeito estufa (GEE).

As emissões totais da indústria do alumínio (da mineração à produção secundária) surgem de emissões diretas do processo (15%), requisitos térmicos (11%) e emissões indiretas do consumo de energia (65%) e outras fontes (9%). A solução é a descarbonização do setor industrial

É pleno entendimento que o alumínio primário (ou seja, alumínio produzido a partir de matérias-primas) é produzido a partir do minério de bauxita por meio de duas etapas principais: refino da alumina a partir do hidróxido de alumínio usando vapor e calor intenso e, em seguida, fundição da alumina em alumínio puro por meio do processo Hall-Héroult, que usa grandes quantidades de eletricidade.

A produção primária de Alumínio normalmente incorpora os quatro estágios seguintes: produção de alumina, produção de ânodo/pasta, eletrólise de Alumínio e fundição de Alumínio. No estágio de produção de alumina, a alumina é extraída da bauxita por digestão termoquímica. Depois, a alumina produzida é alimentada para uma fundição primária de Alumínio, onde é reduzida o Alumínio líquido e O_2 , emitido como CO_2 devido à reação com os ânodos de carbono.

O processo de produção de ânodo/pasta inclui a produção de ânodos de pré-cozimento e pasta, necessários para a eletrólise de Alumínio. O Alumínio líquido é então fundido em lingotes como o produto final.

No entanto, apenas 30% das emissões da produção de Alumínio são diretas, incluindo o consumo de ânodos de carbono; e a geração de energia térmica para produzir calor e vapor industriais



No escopo deste estudo, apresentamos as principais tecnologias de descarbonização para abordar emissões diretas relacionadas à produção de energia térmica serão investigadas. O foco principal tem sido o desenvolvimento de cenários de longo prazo de baixo carbono que delineiam as possíveis rotas para descarbonizar totalmente os setores da indústria.

A indústria do Alumínio é uma das indústrias mais intensivas em energia e emissoras de CO₂, sendo responsável por 275 Mt de CO₂ em 2023; 3% das emissões globais diretas de CO₂. No entanto, quase 20 por cento das emissões de fundição vêm de emissões de processo, ou emissões liberadas da reação de alumina com alumínio.

De acordo com um documento da Mission Possible Partnership, uma aliança de líderes climáticos focada na descarbonização por superalimentação nas indústrias de maior emissão do mundo, as emissões indiretas devidas ao consumo de eletricidade representam a maior oportunidade para a indústria do alumínio reduzir sua pegada de carbono (cerca de 60% das emissões setoriais), mas também deve considerar como lidar com suas emissões diretas (cerca de 30% a 35%).

Retratamos no estudo que existem duas fontes principais de emissões diretas no setor de alumínio: o consumo de ânodos de carbono durante a fundição de alumínio e a geração de energia térmica para processos a altas temperaturas e aduzimos que uma das alternativas para descarbonização do setor é o uso de bioeletricidade renovável para tratar de emissões indiretas.



Trabalhamos com dados de emissões da European Aluminium e da The Aluminum Association (EUA) e aplicados à indústria global, com as mesmas emissões de CO₂e por tonelada assumidas para todos os anos. Assim temos alguns dados de emissão do setor:

Sucata nova – refere-se à sucata dentro da cadeia de suprimentos após a produção de semirreboques = 0,5 toneladas de CO₂e por tonelada de alumínio reciclado

Sucata velha – refere-se à sucata resultante de sistemas de coleta após o produto final ter sido usado e descartado (também conhecido como sucata pós-consumo) = 0,6 toneladas de CO₂e por tonelada de alumínio reciclado

Sucata interna – refere-se à sucata dentro da produção de semis e após a fundição. Normalmente, ela tem processos de loop de sucata interna, onde ligas comuns são recicladas de volta para seu suprimento upstream = 0,3 toneladas de CO₂e por tonelada de alumínio reciclado

Essas emissões são emissões de processo e não representam a pegada de carbono do alumínio reciclado.

Produção de semicondutores de emissões de processo

Processos de produção de semirreboques = 0,3 toneladas de CO₂e por tonelada de semirreboques (2005-2019)

Rolamento = 0,36 toneladas de CO₂e por tonelada de semirreboque (2020-2022)

Extrusão = 0,31 toneladas de CO₂e por tonelada de semirreboque (2020-2022)

Folha = 0,60 toneladas de CO₂e por tonelada de semirreboque (2020-2022)

Fundição = 0,29 toneladas de CO₂e por tonelada de semiacabados (2020-2022)

Outros = 0,37 toneladas de CO₂e por tonelada de semirreboque (2020-2022)



As indústrias de uso intensivo de energia como o Alumínio constituem uma parte significativa da economia e são responsáveis por uma grande quantidade de uso de energia, consumo de recursos e emissões. Quando as emissões indiretas da eletricidade são consideradas, esse número sobe até 1,1 Gt. A produção primária é responsável por mais de 90% dessas emissões. Para atingir o marco de zero emissões até 2050, é necessária uma redução anual de 3% a 8%.

Descrevemos no estudo que a energia usada na produção de alumina metalúrgica é a energia consumida dentro do perímetro da planta pelos processos de refino de bauxita (incluindo calcinação) e por aquelas operações auxiliares no local que estão diretamente conectadas com o processo total de produção. Ela compreende a energia usada por plantas que produzem uma média de 90% ou mais de sua produção total como alumina de grau metalúrgico, e a energia associada com a produção de alumina metalúrgica em outras plantas onde é possível alocar o consumo de energia.

A intensidade energética da fundição de alumínio primário é relatada como energia usada para eletrólise pelos processos Hall-Héroult por tonelada de produção de alumínio. O valor se refere à energia consumida pelas instalações para o processo de fundição, incluindo retificação e auxiliares normais de fundição (incluindo equipamentos de controle de poluição) até o ponto em que o alumínio líquido é retirado das panelas. Ele exclui a energia usada em plantas de fundição e de carbono. O valor é uma métrica de eficiência do processo, que mede a intensidade energética do processo eletrolítico como o consumo de energia após a retificação por tonelada de alumínio líquido extraída dos recipientes.



Neste sentido,

retratamos a importância da eletrificação com bioeletricidade com uso da biomassa de certos processos térmicos.

A rota de produção secundária oferece enormes economias de energia (95%) em comparação com a rota primária, mas as quantidades são impulsionadas pela disponibilidade e preços da sucata, o último dos quais é impulsionado pelo preço do alumínio de origem primária e pelo custo da reciclagem.

A eletrificação de aplicações de baixa e média temperatura, bem como outros processos, é parte integrante da descarbonização. É ainda agravada pelas metas de tornar o setor de energia no Brasil completamente renovável.

No estudo demonstramos que existem outras melhorias no processo de produção de alumínio (como recuperação de calor residual, digestão em baixa temperatura, baixa temperatura de eletrólise e redução carbotérmica de alumina), com vários graus de layout de instalação, processos implementados, co-dependência e outros fatores.

Entendemos que o aquecimento elétrico é um exemplo de uma tecnologia voltada para o futuro da indústria do alumínio, pois tem potencial para substituir processos que requerem calor e vapor sem a combustão de combustíveis fósseis. Poderá desempenhar um papel importante em processos que ainda não estão eletrificados, por exemplo, refinação de alumina ou fornos elétricos para fundição, refusão ou reciclagem.

No estudo temos que o aumento da eletrificação e da energia de fontes renováveis é uma forma de reduzir as emissões em muitos setores de produção do alumínio, e o aquecimento elétrico é uma tecnologia que pode contribuir para a redução de emissões na indústria do alumínio.

O alumínio secundário, ou reciclado, requer apenas 5% da energia necessária para a produção de alumínio primário, portanto, atender a alguma demanda futura com alumínio secundário apoiará a descarbonização geral do alumínio. No entanto, uma grande quantidade de alumínio secundário acaba em aterros sanitários em vez de ser reciclado.



Uma alternativa

que aduzimos no estudo setorial é a descarbonização da eletricidade pode resolver a maioria das emissões da produção primária de alumínio . A maioria das emissões relacionadas à fundição de alumínio vêm da geração de eletricidade, então a descarbonização da eletricidade é a intervenção de maior impacto para a descarbonização do alumínio. Para conseguir isso, as fundições de alumínio devem ser alimentadas por fontes de eletricidade limpas e renováveis, quando possível.

O custo está se tornando uma barreira menor para a descarbonização da eletricidade do que tem sido historicamente, devido à eletricidade renovável se tornar competitiva em termos de custo com a eletricidade de combustível fóssil.

Para maximizar a utilidade da eletricidade renovável, as fundições devem se adaptar implementando tecnologias que permitam a modulação do consumo de energia e o armazenamento de eletricidade em larga escala e longa duração. Essas tecnologias promissoras estaremos descrevendo no estudo setorial.

Outro fator que descrevemos no estudo setorial envolve a descarbonização do calor no setor industrial de produção de alumínio. Embora o refino produza apenas cerca de um sexto das emissões totais da produção primária de alumínio, não devemos ignorar esta etapa quando se trata de descarbonização.

O refino requer primeiro extrair o hidróxido de alumínio através do processo e depois transformá-lo em alumina através da calcinação.

Para o processo de temperatura mais baixa, a combustão de combustível fóssil para produção de vapor pode ser substituída por recompressão mecânica de vapor ou caldeiras elétricas .

Usa eletricidade para alimentar uma série de compressores para aumentar eficientemente a temperatura e a pressão do vapor residual. Para o processo de temperatura mais alta (325 a 400 graus Celsius), caldeiras elétricas podem ser usadas. A segunda etapa, a calcinação, que requer 1.000 graus Celsius de calor, pode ser descarbonizada através da eletrificação ou combustão de hidrogênio verde.

Portanto é de pleno entendimento que o alumínio é, ironicamente, um material intensivo em carbono cuja produção aumentada é necessária para a transição para energia limpa. Para maximizar o benefício climático do alumínio, a produção primária de alumínio deve ser descarbonizada abordando as emissões de eletricidade, processo e aquecimento.

O Departamento de Energia dos EUA estima que a descarbonização do alumínio dos EUA pode exigir de US\$ 10 a US\$ 15 bilhões em investimentos de capital até 2050.

No estudo temos que a produção de alumínio pode ser descarbonizada por meio da bioeletricidade, eliminação de emissões de processos e descarbonização do calor. No entanto, a descarbonização industrial do setor é complexa.

Nas últimas décadas, surgiram vias de descarbonização nos setores industriais. Estas foram impulsionadas por avanços tecnológicos, redução de custos e crescimento de mercado da tecnologia de descarbonização.

Este estudo setorial visa encontrar soluções para a descarbonização das indústrias intensivas em energia como o Alumínio para atingir o marco da neutralidade climática até 2050.

Como relatado no relatório “Energy Technology Perspectives” da Agência Internacional de Energia (AIE), e no relatório “Mission Possible” da Energy Transitions Commission é técnica e economicamente viável atingir a descarbonização total de setores da economia difíceis de reduzir como o alumínio até 2050. Mas serão necessárias inovações tecnológicas para atingir as reduções de emissões necessárias.

O estudo setorial aduz uma série de soluções energéticas para a descarbonização do setor industrial de produção de alumínio com a utilização de fontes de energias renováveis como a biomassa e o hidrogênio para atingir zero emissões em todos os setores como a indústria de alumínio.

Em todos os caminhos para uma economia de carbono zero líquido, a quota da eletricidade com uso da biomassa na procura total de energia aumentará de 20% para mais de 60% até 2060. Isto implica que as fontes de energia renovável variáveis, como uso mais intenso da biomassa e da bioenergia que devem ser integradas em larga escala nos sistemas de energia existentes. O alumínio no Brasil é importante como uma indústria que reúne as condições para ser protagonista no fornecimento de soluções para uma economia de baixo carbono, tais como: energia de origem predominantemente biomassa, com baixíssimas taxas de emissões de gases de efeito estufa.

Contudo, o Brasil tem as vantagens competitivas fundamentais como a bauxita de ótima qualidade e energia limpa e renovável. Diante da demanda por produtos transformados e fechamento de capacidade de produção de alumínio primário, o Brasil tornou-se um importador do metal, comprometendo a competitividade da cadeia. Em relação ao processo de reciclagem, o Brasil é exemplo para o mundo no reaproveitamento do alumínio em si.

O Brasil tem liderado com sucesso a dissociação das emissões de carbono do crescimento econômico.

A descarbonização industrial no Brasil poderá ocorrer de forma diferente em diferentes setores industriais, dependendo das características locais, da viabilidade das opções de descarbonização pode ser fortemente influenciada pelo preço e disponibilidade de biomassa, eletricidade renovável e locais de armazenamento de carbono. Portanto, diferentes estratégias e caminhos para reduzir as emissões em todos os setores devem ser explorados. E no estudo setorial avaliamos os tipos de biomassa de origem florestal e do processo industrial da madeira, da biomassa da agricultura e do beneficiamento agroindustrial e da cana-de-açúcar para suprimento energético do setor produtivo de alumínio.

Finalmente, o estudo setorial avalia as principais tecnologia para a descarbonização as indústrias de alumínio. Enumeramos as tecnologias que contribuem para uma indústria de alumínio mais verde.

O alumínio é usado em vários setores porque é leve, tem uma alta relação resistência- peso e é bom condutor de eletricidade e calor. Também é 100% reciclável , o que o torna um metal valioso para práticas sustentáveis e um componente essencial da transição energética, usado em infraestrutura de energia renovável, linhas de transmissão, armazenamento de energia e na fabricação de componentes de veículos elétricos.

Mas a produção de alumínio emite cerca de 3% das emissões industriais diretas de CO2 do mundo, de acordo com a Agência Internacional de Energia.

E embora a intensidade das emissões da produção de alumínio esteja diminuindo, ela precisa cair muito mais rápido se quisermos atingir emissões líquidas zero até 2050. Assim como acontece com muitas iniciativas de descarbonização, a colaboração desempenha um papel importante na facilitação da mudança. Vejamos as tecnologias que avaliamos com requinte de detalhes no estudo setorial:

1. Tecnologia para descarbonizar a fundição de alumínio. Avaliamos a inovadora tecnologia da empresa norueguesa de alumínio e energia renovável Hydro sobre o alumínio verde. A tecnologia pode descarbonizar totalmente a fundição de alumínio.

A empresa está trabalhando para oferecer um tipo diferente de tecnologia para substituir o processo Hall-Héroult.

Em vez de emitir CO2 durante o estágio de eletrólise, a tecnologia HalZero da Hydro mantém o carbono e o cloro em um circuito fechado, eliminando as emissões de CO2 e emitindo apenas oxigênio.

No estudo retratamos esta importante tecnologia para descarbonização das indústrias de alumínio.



2. Tecnologia Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono é uma tecnologia essencial para reduzir as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE).

No estudo setorial avaliamos os detalhes desta tecnologia como uma cadeia de suprimentos multifacetada que tem a vantagem de permitir emissões negativas enquanto gera energia.

Sua versatilidade é ilustrada pela possibilidade de usar toda a gama de matérias-primas de biomassa e muitas vias de conversão.

É uma tecnologia altamente adaptável, pois pode ser aplicada a uma variedade de indústrias como a do setor de alumínio.

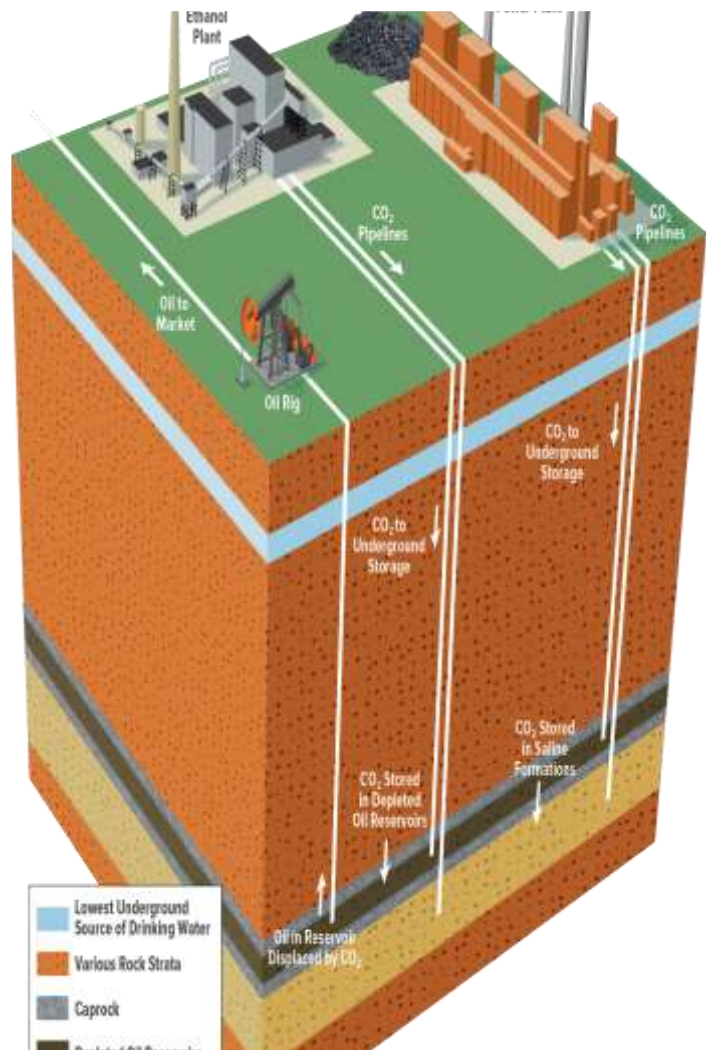
Uma vez que o dióxido de carbono (CO₂) tenha sido capturado, ele deve ser transportado e armazenado, ou mesmo reutilizado. No entanto, a reutilização pode às vezes resultar em nenhuma emissão negativa, pois o CO₂ é liberado na atmosfera em curto prazo.

Num contexto em que limitar o aquecimento global se tornou uma questão urgente, os projetos de captura de carbono ao setor industrial de alumínio precisam de ser encorajados e apoiados para garantir que podem continuar a enfrentar os desafios do futuro

A captura pós-combustão opera em baixas pressões e é adequada para gases de combustão de baixas concentrações de CO₂, mostrando altas eficiências de laboratório a escala comercial.

Essa tecnologia pode reduzir significativamente as emissões de CO₂ das plantas de alumínio. Para esse propósito, um caso de uso está sendo investigado atualmente pelo Alvalance, Trimet, LRF (centro de pesquisa da Rio Tinto) e os Fives Groups para avaliar a maneira mais econômica de capturar carbono em fundições de alumínio.

O projeto está focado na tecnologia de captura baseada em amina para determinar a viabilidade de capturar gases de combustão diretamente versus a necessidade de concentrar o CO₂ para melhor captura.



No setor de alumínio, a captura, utilização e armazenamento de carbono se destaca como uma solução intermediária potencialmente prática. Isso é particularmente verdadeiro para instalações que podem acessar facilmente combustíveis fósseis econômicos, não têm acesso conveniente a fontes de energia renováveis acessíveis, estão distantes do fim de sua vida operacional e a infraestrutura de transporte e armazenamento necessária está disponível

3. Tecnologia Biocarvão/Biocarbono Bio-óleo e Gás sintético para descarbonização das indústrias de alumínio. O biocarvão ou biocarbono recentemente ganhou atenção como um substituto potencial para o carvão em processos siderúrgicos e alumínio devido ao seu potencial de captura de carbono.

Os biocombustíveis produzidos a partir de biomassa residual, como biocarvão, bio-óleo ou gás de síntese, podem ser uma substituição propícia para combustíveis fósseis. O biocarvão recebeu muito interesse como um substituto potencial devido à sua alta combustibilidade, alto conteúdo energético, melhor moabilidade e capacidade reduzida. Além disso, a principal vantagem de usar biomassa ou biocarvão como combustível é sua neutralidade de carbono. No estudo setorial avaliamos os detalhes de produção de biocarvão/biocarbono, bio-óleo e gás sintético para descarbonização das indústrias de alumínio



4. Tecnologia de produção de biometano como substituto ao gás natural.. O biometano, uma forma purificada de biogás produzida pela digestão anaeróbica de matéria orgânica, pode ser integrado em vários estágios da produção de alumínio como um substituto para o gás natural reduzindo assim a pegada de carbono da produção de alumínio. Ele também pode servir como um combustível alternativo em fornos de aquecimento, que exigem quantidades substanciais de gás natural para atingir as altas temperaturas necessárias para o processamento do alumínio, reduzindo assim as emissões de CO₂. Além disso, as plantas de alumínio com suas próprias unidades de geração de energia podem mudar para o biometano para gerar eletricidade com menos emissões de gases de efeito estufa. A Hydro firmou uma carta de intenções com a Havila para a entrega de biometano de curta distância de duas das plantas da Havila localmente em Møre e Romsdal para a Hydro Sunndal. O acordo está condicionado ao projeto receber suporte da Enova para implementação. O biometano a ser produzido virá de esterco e resíduos de peixes. O biometano será usado na fundição e na unidade de produção de ânodos na Hydro Sunndal. No geral, o projeto reduzirá o consumo de gás natural na planta de alumínio da Hydro em Sunndal em 70 por cento.



5. Tecnologia de Hidrogênio Verde produzido por fontes de energia renováveis. Combustíveis alternativos de baixas ou zero emissões de CO₂ são uma solução viável para substituir combustíveis fósseis usados na produção primária do alumínio.

A combustão de Hidrogênio é responsável por zero emissões de CO₂. O Hidrogênio verde é um substituto ao gás natural como retratamos no estudo setorial. Para este propósito, dois casos de uso são apresentados indicativamente na Rio Tinto e na Norsk Hydro.

A Rio Tinto fez uma parceria com a Agência Australiana de Energia Renovável (ARENA) para avaliar a viabilidade técnica do H₂ para substituir o gás natural durante a calcinação na refinaria de alumina de Yarwun em Queensland.

Além disso, a Norsk Hydro pretende investigar o potencial de operar Hidrogênio como uma alternativa ao gás natural para suas próprias operações, enquanto explora um fluxo de receita adicional, já que o Hidrogênio desempenha um papel cada vez maior na economia verde. Estima-se que esta transição reduza as emissões de CO₂ da Hydro em até 30% até 2030.

O objetivo final do estudo setorial é descrever as abordagens mais comuns de uso da biomassa como fonte de bioeletricidade com opção de mitigação relevantes para indústrias de alumínio. Essas opções variam do aumento da eficiência energética e do uso da biomassa como fonte de geração de energia térmica (aquecimento, calor e vapor) ao desenvolvimento e implantação de novas tecnologias de emissões negativas ou zero carbono.

A coalimentação de hidrogênio junto com biomassa para aquecimento industrial é uma abordagem emergente que está sendo explorada por várias indústrias como parte dos esforços para reduzir as emissões de carbono e fazer a transição para fontes de energia mais sustentáveis.

Essa abordagem tem sido amplamente testada em operações de alumínio e tem potencial para reduzir a pegada de carbono da produção de alumina.

O hidrogênio poderia teoricamente ser usado como um agente redutor na indústria do alumínio.

Isso permite a redução sem a produção de quaisquer gases de efeito estufa.

Uma grande quantidade de hidrogênio precisa ser adicionada à reação a uma taxa estável, enquanto a água produzida pela reação deve ser constantemente removida. Altas temperaturas são necessárias para a reação, no mesmo o ponto de fusão do alumínio



O setor de alumínio, embora seja uma parte importante e vital de sua economia, as produções primárias estão diminuindo lentamente. As razões para isso são várias, mas a meta de zero líquido permanece, e todos os setores devem contribuir o máximo que puderem, enquanto permanecem competitivos.

A visão geral neste estudo setorial indica que os custos da tecnologia diminuem à medida que amadurecem. Outras tecnologias mais maduras, como CCUS, podem ser econômicas no alumínio quanto em outras indústrias. Isso se deve a uma baixa concentração de CO₂ no gás de combustão em fundições de alumínio de cerca de 1,5% em comparação com a concentração no gás de combustão de uma instalação de cimento típica de 30% ou em uma usina de carvão de 13,5%. Poucas das tecnologias de descarbonização disponíveis podem ser econômicas, uma vez que o preço de seu custo de implementação atualmente abaixo do custo do CO₂ não reduzido.

Neste estudo ampliamos o leque de opções de descarbonização do setor industrial de alumínio com as tecnologia de produção de biocarvão/biocarbono, bio-óleo e gás de síntese como um substituto do carvão, óleo diesel e o gás natural.

Bem como a utilização do biometano e do hidrogênio verde como um substituto do gás natural.

No entanto, enquanto as tecnologias reduzem em preço devido à maturação e ao aumento de escala, o CO₂ provavelmente aumentará em preço, aproximando o ponto de inflexão.

Algumas tecnologias existem, e são viáveis economicamente, como CCUS, enquanto outras, como ânodos inertes, estão em seus estágios iniciais e ainda não podem ser implantadas. Cada tonelada de alumínio primário importado e produzido internamente que é substituído por alumínio reciclado internamente reduz as emissões de CO₂e em 12,85 e 6,55 toneladas, respectivamente. A eletrificação direta com bioeletricidade da biomassa é outro caminho possível.

Algumas atividades podem ser implementadas imediatamente, como mais coleta e eficiência de reciclagem, mas a relação custo-benefício disso depende das condições de mercado, incluindo o preço da sucata, o custo da reciclagem e o preço do alumínio bruto.

Enfrentar o desafio da descarbonização do alumínio requer uma abordagem multifacetada que combine inovação tecnológica, suporte político e colaboração da indústria e conscientização do consumidor.

Esforços estão em andamento para desenvolver e implementar processos de baixo carbono e neutros em carbono, aumentar o uso de fontes de energia renováveis, avançar na pesquisa de novos materiais e tecnologias e envolver as partes interessadas para impulsionar iniciativas de sustentabilidade na descarbonização do alumínio.

AUTOR DO ESTUDO SETORIAL