

Potencial técnico, econômico e de mercado da resposta da demanda com foco no setor industrial brasileiro

Caderno 2: Produtos de resposta da demanda aplicáveis a industriais energo-intensivos



Imprint

Publisher

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Registered offices: Bonn and Eschborn, Germany

Project

German-Brazilian Energy Partnership
SCN Quadra 01, Bloco C, Sala 1501
70711-902 Brasília – DF, Brazil
Kristina Kramer
E-mail: kristina.kramer@giz.de
Stéphanie Gomes
E-mail: stephanie.gomes@giz.de
Gabriela Kaya
E-mail: gabriela.kaya@giz.de
Website: www.energypartnership.com.br
Tel.: +55 61 2101 2170

Text

PSR
Mitsidi Projetos

As at

29/11/2023

Design

Vaz Gontijo Consultoria, Brasilia

This publication is available for download only.

The contents of this publication do not necessarily express the opinion of Energy Research Office (EPE).

Energy Partnership



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



In charge of implementing the bilateral partnership



Conteúdo

Lista de figuras	4
Lista de tabelas	6
1. Introdução	10
1.1 Organização do relatório	11
2. Classificação de produtos de resposta da demanda	12
2.1 Princípios para uma estrutura de classificação	12
2.2 Uma metodologia de classificação “clássica”	12
2.3 Metodologia de classificação utilizada neste trabalho	15
2.4 Aplicação da metodologia em exemplos reais	19
2.5 Uma análise do histórico de produtos de RD brasileiros	21
3. Propostas de modelagem de RD para o SEB	25
3.1 Produto resposta de curto prazo	25
3.2 Contrato de longo prazo	27
4. Aplicabilidade aos segmentos industriais de interesse	30
4.1 Metodologia	30
4.2 Indústria do aço	31
4.3 Indústria do alumínio	39
4.4 Indústria do cimento	49
4.5 Indústria do cloro	56
4.6 Indústria do papel	61
4.7 Indústria de alimentos e bebidas	67
4.8 Indústria do saneamento	77
4.9 Indústria de data center	83
5. Conclusões	88
Referências	89

Lista de figuras

Figura 1 – Percentual de atendimento aos acionamentos por segmento	23
Figura 2 – Média de oferta em MW de cada segmento por produto	23
Figura 3 – Montantes efetivamente reduzidos por produto em MWh	24
Figura 4 – Montante reduzido por hora no RVD	24
Figura 5 – Produto Resposta de Curto Prazo	27
Figura 6 – Produto Demanda Ponta	29
Figura 7 – Produto Demanda Média	29
Figura 8 – Visão geral da cadeia metalúrgica e materiais metálicos	31
Figura 9 – Distribuição percentual da produção de aço bruto do Brasil, por região geográfica, em 2021	32
Figura 10 – O processo produtivo da fabricação do aço bruto	33
Figura 11 – Visão geral da cadeia produtiva de alumínio	39
Figura 12 – A relação da sucata de alumínio recuperada e o consumo doméstico no ano de 2019 no mundo	42
Figura 13 – Matriz energética da cadeia produtiva do alumínio	45
Figura 14 – Cadeia produtiva do setor do cimento	49
Figura 15 – Ranking da produção mundial de cimento	50
Figura 16 – Distribuição regional da produção de cimento no Brasil	50
Figura 17 – Resumo do processo produtivo de fabricação do cimento	52
Figura 18 – Matriz energética da produção de cimento ao longo dos anos	53
Figura 19 – Cadeia produtiva do cloro e derivados	56
Figura 20 – Histórico do fator de utilização das indústrias de produção de cloro	57
Figura 21 – Distribuição da capacidade instalada de produção de cloro por estado	57
Figura 22 – Resumo do processo produtivo de cloro e soda cáustica	58
Figura 23 – Cadeia produtiva papel e celulose	61
Figura 24 – Ranking da produção mundial de papel por milhões de toneladas	61
Figura 25 – Produção de papel por tipo, milhões de toneladas	62

Figura 26 – Resumo do processo produtivo fabricação do papel	64
Figura 27 – Matriz energética da indústria de papel e celulose	65
Figura 28 – Matriz energética do segmento de alimento e bebidas	73
Figura 29 – Matriz energética do segmento de alimento e bebidas, excluindo a fonte bagaço de cana	73
Figura 30 – Matriz energética do segmento de alimento e bebidas, excluindo a fonte bagaço de cana	74
Figura 31 – Avaliação do nível de acesso ao saneamento no país	77
Figura 32 – Atendimento por abastecimento de água por macrorregião geográfica	78
Figura 33 – Principais indicadores de saneamento básico das capitais do país	79
Figura 34 – Prestadores de serviço de abastecimento de água	80
Figura 35 – Histórico do consumo de eletricidade no setor de serviço público, em GWh	81
Figura 36 – Integrantes do setor de data centers	83
Figura 37 – Distribuição do segmento de data centers por setores	83
Figura 38 – Distribuição mundial do setor de data center	83
Figura 39 – Espaços e subsistemas de um data center	85
Figura 40 – Histórico do consumo de eletricidade do setor de telecomunicações no Brasil, em GWh	86

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação de parâmetros quanto ao nível de flexibilidade operativa	15
Tabela 2 – Classificação da dimensão “duração do compromisso”	16
Tabela 3 – Classificação da dimensão “antecedência do acionamento”	16
Tabela 4 – Classificação da dimensão “duração máxima do acionamento”	17
Tabela 5 – Classificação da dimensão “frequência máxima de acionamento”	17
Tabela 6 – Classificação da dimensão “frequência de penalidades”	18
Tabela 7 – Classificação da dimensão “restrição de participação”	18
Tabela 8 – Classificação de parâmetros de mecanismos de resposta da demanda	19
Tabela 9 – Aplicação de metodologia à experiência brasileira	21
Tabela 10 – Produtos e grade horária do mecanismo de RVD	22
Tabela 11 – Acionamentos por segmento industrial	22
Tabela 12 – Consumo de energia elétrica por setor industrial no Brasil, em 2021	30
Tabela 13 – Ranking mundial da produção de aço bruto por país, em 2021	31
Tabela 14 – Participação por união federativa na produção de aço bruto do país, em 2021	32
Tabela 15 – Principais empresas do setor de produção do Aço, em 2021	33
Tabela 16 – Comparação das rotas tecnológicas para produção do aço bruto	34
Tabela 17 – Consumo de energia elétrica no setor de metalurgia no Brasil, em 2021	34
Tabela 18 – Consumo de energia por fonte na produção de aço	35
Tabela 19 – Avaliação da relevância da produção de aço bruto	35
Tabela 20 – Consumo de energia por fonte na produção de aço	35
Tabela 21 – Consumo de energia específico médio na produção de aço bruto para diferentes rotas tecnológicas	36
Tabela 22 – Relevância do consumo de eletricidade para produção de aço bruto para diferentes rotas tecnológicas por etapa do processo produtivo	37
Tabela 23 – Principais equipamentos consumidores de energia elétrica na produção de aço bruto para diferentes rotas tecnológicas	37

Tabela 24 – Avaliação de destinação da energia elétrica por uso final, para diferentes as rotas tecnológicas	38
Tabela 25 – Perfil da indústria do alumínio	40
Tabela 26 – Faturamento e investimentos em Real	40
Tabela 27 – Ranking mundial de produção de alumínio primário	41
Tabela 28 – Histórico da produção dos tipos de transformados de alumínio em mil toneladas	41
Tabela 29 – Principais empresas do setor de produção do Alumínio primário, em 2021	43
Tabela 30 – Principais empresas do setor de produção do Alumínio, em 2021	43
Tabela 31 – Principais processos produtivos na indústria de transformados de alumínio	44
Tabela 32 – Consumo de energia elétrica no setor de metalurgia e fabricação de produtos de metal no Brasil, em 2021	45
Tabela 33 – Análise qualitativa da relevância do consumo de eletricidade dos subsegmentos da cadeia produtiva do alumínio	46
Tabela 34 – Classificação das etapas da indústria do alumínio	46
Tabela 35 – Relevância do consumo de eletricidade para os subsegmentos do alumínio	47
Tabela 36 – Principais equipamentos consumidores de energia elétrica na produção de alumínio, para diferentes rotas tecnológicas	47
Tabela 37 – Avaliação de destinação da energia elétrica por uso final, para diferentes as rotas tecnológicas	48
Tabela 38 – Informações sobre os principais grupos cimenteiros do país	51
Tabela 39 – Consumo de energia elétrica no setor de fabricação de produtos de minerais não-metálicos no Brasil, em 2021	52
Tabela 40 – Avaliação da relevância da produção de cimento	53
Tabela 41 – Consumo de energia específico médio na produção de cimento	54
Tabela 42 – Relevância do consumo de eletricidade para produção de cimento, por etapa do processo produtivo, para cada subsegmento	54
Tabela 43 – Principais equipamentos consumidores de energia elétrica na produção de cimento	55
Tabela 44 – Indicadores da indústria de cloro no Brasil	57
Tabela 45 – Capacidade instalada de produção de cloro por empresa, em 2019	58

Tabela 46 – Consumo de energia elétrica no setor de fabricação de produtos químicos no Brasil, em 2021	59
Tabela 47 – Avaliação da relevância da produção de soda-cloro em relação ao consumo de eletricidade do setor de fabricação de produtos químicos e ao setor industrial como um todo	59
Tabela 48 – Consumo de energia específico médio na produção de soda-cloro	60
Tabela 49 – Relevância do consumo de eletricidade para produção de soda-cloro por etapa do processo produtivo	61
Tabela 50 – Avaliação de destinação da energia elétrica por uso final	62
Tabela 51 – Principais empresas mapeadas produtoras de papel do país	63
Tabela 52 – Consumo de energia elétrica no setor de fabricação de celulose, papel e produtos de papel no Brasil, em 2021	64
Tabela 53 – Avaliação da relevância subsegmento de produção de papel em relação ao consumo de eletricidade setor industrial de papel e celulose e ao setor industrial como um todo.	65
Tabela 54 – Consumo de energia específico médio na produção de papel, para diferentes rotas tecnológicas	66
Tabela 55 – Relevância do consumo de eletricidade para produção de papel por etapa do processo produtivo	66
Tabela 56 – Avaliação de destinação da energia elétrica por uso final na produção de papel	66
Tabela 57 – Evolução da produção da indústria de alimentos brasileira	68
Tabela 58 – Evolução da produção em milhares de litros da indústria de bebidas alcoólicas brasileira	69
Tabela 59 – Evolução da produção em milhares de litros da indústria de bebidas não alcoólicas brasileira	69
Tabela 60 – Desempenho de indicadores da avicultura, bovinocultura de corte e suinocultura no Brasil (milhões de toneladas)	69
Tabela 61 – Ranking de participação de mercado, empresas fabricantes de produtos alimentícios	70
Tabela 62 – Ranking de participação de mercado, empresas fabricantes de bebidas não alcoólicas	70
Tabela 63 – Ranking de participação de mercado, empresas fabricantes de bebidas alcoólicas	71
Tabela 64 – Principais etapas do processo produtivo para os subsegmentos da indústria de alimentos selecionados	72
Tabela 65 – Consumo de energia elétrica no setor de produtos alimentícios e bebidas no Brasil em 2021	73

Tabela 66 – Avaliação da relevância da produção de subsegmentos	74
Tabela 67 – Etapas do processo produtivo relevantes para os subsegmentos	75
Tabela 68 – Principais equipamentos consumidores de energia elétrica nos subsegmentos selecionados ...	76
Tabela 69 – Avaliação de destinação da energia elétrica por uso final para os subsegmentos selecionados da indústria de alimentos e bebidas	76
Tabela 70 – Avaliação da relevância da produção de aço bruto	81
Tabela 71 – Relevância do consumo de eletricidade nas empresas de abastecimento de água, por etapa do processo produtivo	82
Tabela 72 – Lista de empresas destaques do setor de data center no Brasil	84
Tabela 73 – Características principais de cada nível de Tier	85
Tabela 74 – Relevância do consumo de eletricidade para o segmento de data centers, por etapa do processo	87
Tabela 75 – Avaliação de destinação da energia elétrica por uso final, para diferentes as rotas tecnológicas	87

1. Introdução

Ao longo dos últimos anos, o Sistema Elétrico Brasileiro tem experienciado mudanças no padrão de consumo, decorrentes de uma maior eletrificação da economia, diferentes perfis de consumo industrial e maior uso de eletrodomésticos. Além das mudanças do perfil do lado da demanda, também se verifica forte alteração dos perfis de geração do sistema devido ao aumento significativo na participação das chamadas “fontes de produção variáveis” na matriz elétrica. Este crescimento foi causado por fatores como a forte queda de custos de implantação de usinas solares e eólicas, surgimento de novos modelos de negócios nos mercados cativo e livre, redução de prazos de construção e uma menor complexidade no licenciamento ambiental.

Por outro lado, a construção de novas usinas hidrelétricas (UHEs), fonte de uma energia renovável altamente flexível e que pode ser armazenada nos reservatórios, vem se mostrando um grande desafio por preocupações relativas aos seus impactos econômicos e socioambientais.

Esta combinação de perfis de produção e consumo muito variáveis vêm exigindo recursos capazes de prover flexibilidade operativa ao sistema para assegurar uma boa adequabilidade e confiabilidade de suprimento de energia. Fenômenos macro climáticos adversos também demandam esta flexibilidade, uma vez que secas severas podem demandar o acionamento de recursos que ora não seriam necessários em hidrologias normais.

Neste contexto, a resposta pela demanda é um mecanismo bastante conhecido e amplamente utilizado para balancear a oferta e a demanda em sistemas elétricos através da redução ou deslocamento do consumo de energia em momentos críticos.

No entanto, apesar da existência de estruturas regulatórias conhecidas e disponibilidade tecnológica para aplicação do mecanismo, uma possível barreira de entrada para este é o custo envolvido na redução de consumo e o efetivo potencial de redução das atividades eletrointensivas que poderiam participar do eventual mecanismo (geralmente atividades ligadas ao setor industrial). Por exemplo, os custos para um consumidor reduzir seu consumo por 3 horas ao dia por 6 dias são diferentes daqueles para se reduzir x% de seu consumo durante 3 dias. Portanto, a implementação de novos tipos de produtos no mercado deve levar em consideração os investimentos envolvidos para cada aplicação seja no curto, médio ou longo prazo, ou seja, há necessidade de regulamentação adequada e estável e que leva em consideração o contexto das atividades industriais de cada sistema.

No Brasil, a implantação deste mecanismo foi primeiramente proposta em 2017, através de um projeto piloto para que fosse avaliada a inserção de resposta da demanda por “clientes despacháveis” no Sistema Elétrico Brasileiro. Este projeto teve início em 2018, mas, por uma série de questões na sua implementação, não obteve grande adesão por parte dos consumidores.

Mais tarde, em 2021, para combater a escassez energética vivida pelo país, foi implantando o programa de Redução Voluntária da Demanda. Já em 2022, a ANEEL abriu a Consulta Pública nº 80 visando a evolução do programa piloto para um programa estrutural. Com base no sucesso do programa RVD, a nova regulamentação estrutural se deu em agosto de 2022, instituindo produtos de resposta da demanda.

Logo, a fim de contribuir para o processo de modernização do Sistema Elétrico Brasileiro, no âmbito da “Parceria Energética Brasil-Alemanha”, a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) GmbH, em conjunto com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), contrataram a PSR e a MITSIDI para o desenvolvimento do estudo “Potencial técnico, econômico e de mercado da resposta da demanda com foco no setor industrial brasileiro”. Este estudo será composto por sete cadernos:

- **Caderno 1:** Análise de experiências internacionais de resposta da demanda;
- **Caderno 2:** Produtos de resposta da demanda aplicáveis a industriais energo-intensivos;
- **Caderno 3:** Análise de flexibilidade, receitas e custos, rotas de resposta da demanda (RD) e adequação aos produtos de RD;
- **Caderno 4:** Necessidade de resposta da demanda para o sistema no futuro;
- **Caderno 5:** Metodologia para análise de potencial industrial;
- **Caderno 6:** Possíveis barreiras à resposta da demanda no Brasil;
- **Caderno 7:** Relatório final.

Os estudos e análises realizados em cada caderno, em conjunto, têm como objetivo fornecer uma visão holística sobre os mecanismos de resposta da demanda, sua adequabilidade de aplicação no contexto brasileiro, e o potencial de adesão do mercado a estes.

O presente relatório se relaciona ao Caderno 2, que elenca os principais produtos de resposta da demanda a serem examinados neste trabalho, considerando o conjunto de características e parâmetros apontados como definidores deste tipo de produto.

1.1 Organização do relatório

Este relatório conta com cinco capítulos. O primeiro deles se refere a esta introdução. O segundo capítulo, considerando experiências internacionais relatadas no Caderno 1 deste trabalho, introduz uma taxonomia para classificar as diferentes experiências internacionais usando uma linguagem comum para contrastar os elementos de desenho (principais parâmetros) relevantes a cada uma delas. Esses parâmetros teóricos foram então cruzados com as experiências práticas, trazendo alguns *insights* sobre as características dos produtos observadas ao redor do mundo e dando exemplos realistas de aplicações do modelo teórico.

Com essas características em mente, no capítulo 3, algumas proposições são feitas para o caso brasileiro, pensando em atender restrições de energia e de potência, aplicadas à realidade do desenho de mercado vigente no país. Finalmente, no capítulo 4 é executado um levantamento preliminar de informações disponíveis sobre os segmentos industriais de interesse e do quão flexíveis cada um destes poderia ser na oferta de produtos de resposta da demanda. Este levantamento preliminar subsidiou a formulação dos produtos propostos apresentados no capítulo 3, e servirá como ponto de partida para os aprofundamentos dos próximos entregáveis.

O capítulo 5 apresenta uma breve conclusão, após o qual apresentam-se as referências utilizadas.

2. Classificação de produtos de resposta da demanda

2.1 Princípios para uma estrutura de classificação

No presente capítulo, apresenta-se na seção 2.3 uma proposta de taxonomia “padronizada” que, espera-se, seja capaz de capturar toda a variedade de diferentes mecanismos de resposta da demanda aplicados em diferentes países. De modo a ilustrar essa aplicabilidade, a seção 2.4 ilustra como algumas experiências particulares com programas de resposta da demanda (tanto experiências do próprio Brasil quanto experiências internacionais exploradas no entregável 2 do presente projeto) podem ser classificadas de acordo com este paradigma proposto. O objetivo será, finalmente, no capítulo 3, apresentar uma proposta para a representação de produtos resposta da demanda aplicável ao sistema brasileiro utilizando esta taxonomia para a descrição dos produtos. Desta forma, com a criação de uma linguagem padronizada, pode-se discutir de forma mais clara os prós e contras de eventuais mudanças nas características dos produtos de resposta da demanda propostos neste trabalho, explorando portanto outros espaços de possibilidades para o produto resposta da demanda.

Por outro lado, esta classificação proposta não é de forma alguma universal, e é relevante discutir os programas de resposta da demanda também segundo uma classificação “clássica” baseada em (i) mecanismos baseados em preços (não despacháveis), (ii) mecanismos baseados em quantidades com características contratuais/regulatórias, e (iii) mecanismos baseados em quantidades com características de mercado. Esta taxonomia é utilizada em diversas referências da literatura, e será detalhada na seção 2.2. Esta classificação alternativa, embora seja comumente utilizada e seja capaz de abarcar uma série de mecanismos de resposta da demanda, tem mais dificuldade em destacar as principais similaridades e diferenças entre diferentes aplicações – o que pode ser endereçado mais facilmente pelos diferentes “eixos” de elementos de desenho da taxonomia proposta na seção 2.3.

Finalmente, na seção 2.5, fazemos uma análise do histórico dos mecanismos de resposta da demanda que já foram implementados no Brasil no passado e uma percepção preliminar do grau de receptividade da indústria a estes programas. Esta análise, complementada pelas explorações dos setores industriais apresentada no capítulo 4, contribui para respaldar a construção da recomendação de elementos de desenho que é apresentada no capítulo 3.

2.2 Uma metodologia de classificação “clássica”

Como já mencionado anteriormente neste trabalho, os mecanismos de resposta da demanda podem, em um primeiro momento, ser classificados quanto à forma de incentivo à adesão e operação da redução. Neste tipo de classificação, separamos os mecanismos de resposta da demanda entre mecanismos despacháveis e não despacháveis. Por sua vez, os mecanismos despacháveis podem ser classificados entre mecanismos *regulatórios* e mecanismos *de mercado*.

Os mecanismos não despacháveis, ou *via-preços*, incentivam o consumidor a reduzir ou deslocar seu próprio consumo (sendo ele mesmo responsável pela operacionalização destes acionamentos) através de estruturas dinâmicas de tarifação. Os mecanismos por preço incluem as Tarifas Horárias (TOU) que, no caso brasileiro, seriam equivalentes às tarifas Horo Sazonais tais como azul e verde. Estas modalidades já existem no Brasil há várias décadas e tiveram um papel importante em modificar a curva de carga ao reduzir os picos noturnos. Entretanto, não é um mecanismo flexível e, portanto, não se adequa às necessidades de resposta da demanda que são objeto deste estudo. Estas tarifas são rígidas em termos horários e preços fixos, não permitindo uma resposta em função da criticidade do sistema. Versões mais sofisticadas de tarifação incluem *Critical Peak Pricing* e *Real Time Pricing*, as quais permitem uma precificação mais granular, justamente em momentos em que o sistema mais precisa, permitindo, portanto, a reação da demanda.

Já os mecanismos despacháveis, ou *por-quantidade*, oferecem pagamentos para consumidores que aceitam reduzir seu consumo em determinadas horas do dia, podendo esta redução ser operacionalizada pelo próprio consumidor ou até por um operador com acesso e controle remoto das instalações do consumidor. Como introduzido anteriormente, mecanismos por quantidade contemplam duas subclasses de mecanismo:

- Os mecanismos regulatórios (ou contratuais) tipicamente envolvem o estabelecimento de um contrato com fim específico de provisão do serviço de resposta da demanda

- Os mecanismos de mercado envolvem a inserção dos produtos de resposta da demanda como participantes de mercados para produtos específicos do setor elétrico (como o produto energia, capacidade, e serviços ancilares)

Os mecanismos de mercado em geral pressupõem algumas características fundamentais, tais como a competição entre diferentes agentes que possam ofertar serviços similares (como unidades de armazenamento e centrais geradoras competindo com a resposta da demanda) e a precificação ao custo marginal. Por outro lado, os mecanismos regulatórios são mais flexíveis e podem ser aplicados em uma gama mais ampla de situações.

Como exemplo de **Mecanismos Regulatórios** podemos citar os seguintes modelos:

Contratos interruptíveis

São contratos celebrados entre os consumidores e as distribuidoras/comercializadoras que dão, a estas últimas, o direito de interromper o fornecimento mediante certas condições pré-estabelecidas. As tarifas de contratos interruptíveis são inferiores aos contratos que não contêm esta prerrogativa. Desta forma, são mecanismos eficazes de resposta de demanda, principalmente se a interrupção puder ser automatizada. Estes contratos desempenharam um papel muito importante durante a crise da Califórnia, em 2001, limitando a intensidade e frequência dos rolling black-outs.

Controle de carga

É um conjunto de mecanismos que permite à distribuidora (ou um agregador atuando em seu nome) controlar certas cargas não essenciais de seus clientes, como ar-condicionado, durante momentos críticos, mediante ligamento/desligamento remoto. O controle de carga permite reduzir a demanda de pico e facilitar o restabelecimento do sistema, seja a nível de alimentador, seja para uma inteira região. A compensação ao consumidor optante se dá mediante um pagamento anual fixo. Este mecanismo é muito utilizado para cargas de menor porte, em uma base *"opt-in"*, e espera-se que seja de crescente importância no mercado norte-americano.

Já os **Mecanismos de Mercado** são instrumentos que permitem a participação dos consumidores como agentes do mercado, e serão o foco principal deste estudo. Os consumidores participantes se disponibilizam para reduzir sua carga líquida (carga menos geração própria, se houver) mediante algum tipo de compensação que reflete as condições de oferta e demanda. Quanto mais críticas as condições do sistema, maiores as oportunidades de participação dos agentes. A forma de participação e o cardápio de produtos é muito variado, e como mencionado no relatório de experiências internacionais, suas características podem depender do mercado ao qual fazem parte. A seguir descrevemos estes modelos.

Demand Side Bidding (DSB)

É um mecanismo consagrado através do qual os consumidores qualificados (em termos de porte ou outros atributos) fazem suas ofertas de redução de carga no mercado de energia no *"day-ahead"*, a um preço mínimo *"x"*. O resultado é um aumento da elasticidade da demanda. O operador do sistema (ou agente de mercado) considera tanto as ofertas de geração quanto as de redução de carga (DSB) no processo de formação de preços e de *"unit commitment"*. Caso o preço de equilíbrio seja superior a *"x"*, o ofertante reduzirá sua carga. Há duas situações que determinam a remuneração do consumidor:

- Se não houver despacho fora da ordem de mérito: neste caso, o benefício ao consumidor será o de ter economizado uma energia cara e reduzido suas despesas. Caso o consumidor tenha um contrato com uma comercializadora, esta posição contratual *"long"* será vendida no mercado. Não há qualquer outra compensação devida.¹
- Se houver despacho fora da ordem de mérito: neste caso, há dois benefícios ao consumidor: (i) economizar energia, tal como descrito acima; e (ii) um pagamento explícito pelo mercado correspondendo à diferença entre o preço da energia e o preço cap do mercado (no Brasil, seria equivalente à diferença entre CMO e PLD máximo).

O DSB se materializa no mercado de energia, apesar dos produtos terem como objetivo a redução da demanda de pico, sendo uma versão mais sofisticada do programa RVD introduzido no Brasil em 2021. A diferença fundamental é que, no caso de DSB, as ofertas de redução de carga e de geração *"formam preço"*, o que dá ao processo mais (i) eficiência, uma vez que estimula a concorrência entre ambas; e (ii) transparência, dado que todos os agentes são despachados segundo o mesmo critério (objetivo e verificável).

¹ Não há consenso entre experts quanto à forma de remuneração de DSB no mercado. Uma primeira corrente defende que DSB não faz jus a receber o preço spot pela energia economizada. Outros experts (dentre os quais se inclui o FERC), acreditam que cabe ao ofertante de DSB receber o preço de mercado pela energia cortada.

Apesar de ser uma metodologia consagrada, o DSB não é o mecanismo mais difundido no campo da resposta da demanda nos EUA, e não se espera que este panorama seja diferente no futuro². Há duas possíveis razões:

- i. o mecanismo é voluntário, ou seja, não há obrigação do consumidor em reduzir sua carga em tempo real, o que dá menos segurança ao operador quanto à confiabilidade da resposta da demanda em caso de real necessidade. Na visão do operador, o DSB não é um recurso em si, mas uma promessa de redução de carga;
- ii. Em princípio, o consumidor poderia auferir os mesmos benefícios de DSB se acompanhar a evolução de preços em tempo real e reduzir sua carga quanto lhe for economicamente vantajoso.³

RD como um participante do mercado de capacidade

Neste caso, os consumidores participam do mercado de capacidade em condições isonômicas com outras fontes de geração. A participação neste mercado se faz com base em leilões reversos, onde, em princípio, todas as fontes podem participar. Os contratos são tipicamente de 3 a 5 anos, refletindo a volatilidade típica no mercado de capacidade. Há duas diferenças básicas em relação ao mecanismo de DSB: (i) o consumidor recebe um pagamento fixo por disponibilidade, porque, neste caso, a resposta da demanda é considerada um recurso, aos moldes de uma usina geradora, e será tratado como tal; e (ii) o mecanismo é compulsório para os consumidores participantes, ou seja, há uma obrigação de redução de carga em caso de “despacho” (ou instrução para desligamento) pelo operador do sistema, havendo penalidades pelo descumprimento. Este tipo de resposta da demanda se constitui em um recurso muito confiável para o operador, com o que ele pode contar se necessário. O mercado de capacidade já é, e deverá continuar sendo, o principal mercado para a resposta da demanda nos Estados Unidos.

Entendemos que, com os leilões de reserva de capacidade, está se formando no Brasil um embrião de um mercado de capacidade, e que a resposta da demanda teria plenas condições de participação em condições isonômicas com outras fontes de geração. O programa RVD implementado em 2021, apesar de seu caráter voluntário, mostrou o potencial vibrante de resposta da demanda por parte dos consumidores industriais. Caberia aproveitar este momento para aprimorar o RVD. Desnecessário dizer que esta participação isonômica somente faz sentido se os leilões forem realmente de reserva de capacidade, como o nome assim o sugere.

Caso os requerimentos do sistema indiquem a necessidade de fontes que produzam energia e potência, a resposta da demanda não teria condições de participar em igualdade de condições. Para tal, sugere-se que sejam estudados mecanismos que permitam a participação isonômica de uma variedade de fontes e que fosse realizado um leilão combinatório de dois produtos simultâneos, ou seja, potência e energia. Resposta da demanda, baterias ou re-potenciação de hidrelétricas ofereceriam apenas o produto potência; renováveis variáveis, apenas o produto energia; enquanto usinas térmicas a gás natural ou outros combustíveis, bem como hidrelétricas/biomassa ou renováveis com armazenamento ofereceriam os dois produtos. A adjudicação, como em qualquer leilão combinatório, seria feita àquela combinação de propostas que melhor atendesse aos requerimentos do leilão, a mínimo custo.

RD como um participante do mercado de serviços ancilares

Neste caso, valem muitas das observações relativas à participação de resposta da demanda no mercado de capacidade. A resposta da demanda deve ser encarada como um recurso confiável, para o qual há um pagamento por disponibilidade e uma obrigação de entrega quando solicitado pelo operador. A diferença básica é que, para participar deste mercado, a resposta da demanda deve ser capaz de responder com mínima antecipação e de forma muito rápida. Tecnologias de automação e comunicação permitem que vários mecanismos de resposta da demanda (seja via controle de carga, seja via mercado) respondam com a velocidade necessária para o provimento de serviços ancilares, mesmo nos usos que requerem mais rapidez de resposta, tais como regulação de frequência. A resposta da demanda tem condições de prover serviços ancilares, e diversas licitações competitivas têm comprovado que a resposta da demanda é competitiva.

Com base na experiência norte-americana, constata-se que o mercado de serviços ancilares é inferior ao mercado de resposta da demanda para o provimento de capacidade. Entretanto, é um mercado promissor – e crescente – para acomodar as variações de produção de fontes intermitentes não síncronas, tais como eólicas e solares. No caso brasileiro, não existe ainda um mercado de capacidade. Os provedores de serviços ancilares no Brasil são principalmente as usinas hidrelétricas, as quais recebem um pagamento regulado, especificado pela ANEEL. A possibilidade de criar um mercado de serviços ancilares está sendo discutida, e é importante que a participação da resposta da demanda seja tratada de forma isonômica.

2 Muitos dos exemplos aqui citados se referem aos Estados Unidos por ser este o país com mais experiência no campo de resposta da demanda, bem como quanto a representatividade de RD na demanda total de pico (cerca de 6%).

3 Esta é uma visão simplificada, pois exige do consumidor um monitoramento em tempo real, caso este não for parte do mecanismo de DSB, bem como não auferir uma receita adicional se houver restrições de transmissão e operação fora da ordem de mérito.

2.3 Metodologia de classificação utilizada neste trabalho

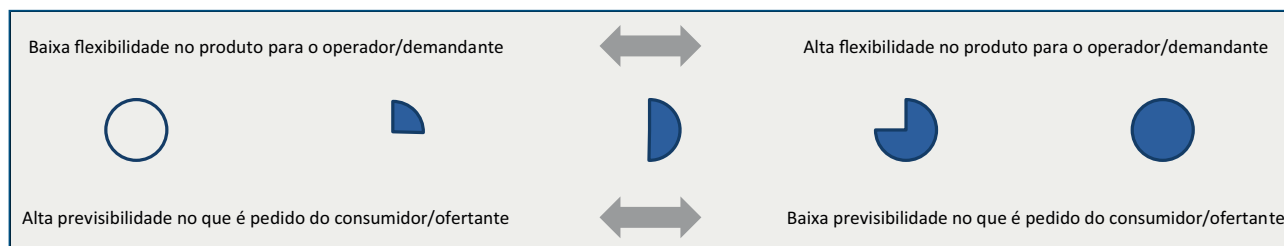
Para classificar de forma padronizada os diferentes produtos de resposta da demanda existentes, foi criada uma metodologia que se organiza ao redor de 8 principais “dimensões” de análise, ou elementos de desenho para o produto resposta da demanda. As dimensões escolhidas para análise dos produtos serão detalhadas a seguir, mas representam: (i) o tipo de remuneração (fixa ou variável), (ii) a definição da linha de base (como identificar se houve redução de fato), (iii) a duração do compromisso de resposta da demanda, (iv) a antecedência do acionamento (i.e. quando o operador informa ao agente a necessidade de reduzir a demanda), (v) a duração máxima do acionamento (por evento acionado pelo operador), (vi) a frequência máxima do acionamento, (vii) a frequência e tolerância das penalidades (em caso de não cumprimento com os compromissos assumidos) e, por último, (viii) a existência de restrições à participação (classes de consumo, presença de gerador próprio, e considerações similares).

Para cada uma destas dimensões, deve ser feita uma escolha de desenho, e o conjunto das escolhas para as 8 dimensões disponíveis é o que caracteriza cada programa em particular de resposta da demanda. A título

de exemplo, serão apresentados na seção 2.4 a lista de escolhas que caracteriza alguns programas nacionais e internacionais. De modo a padronizar a representação e facilitar a comparação entre diferentes aplicações, construiu-se uma “escala” (apresentada na Tabela 1 que caracteriza, para cada dimensão do produto, o quão flexível ele é para o operador (que estabelece a demanda por uma ação de resposta) e para o consumidor (que oferta esse produto). Vale ressaltar que esses valores são inversamente proporcionais, ou seja, quanto mais flexível para o operador, menos previsível será para o consumidor e vice-versa.

Vale destacar ainda que, na prática, esta classificação em termos do nível de flexibilidade operativa visa apresentar uma síntese das escolhas de desenho de diferentes programas – para uma caracterização completa, detalhes adicionais são importantes dentro de cada uma das dimensões de elementos de desenho. Adicionalmente, cada dimensão possui a sua própria categorização (seguindo em linhas gerais a lógica apresentada na Tabela 1), como será explorado nas subseções a seguir.

Tabela 1 – Classificação de parâmetros quanto ao nível de flexibilidade operativa.



2.3.1 Tipo de remuneração

O tipo de remuneração é uma dimensão que não se encaixa facilmente na escala definida de flexibilidade e, portanto, foram criadas três principais categorias para esta dimensão em particular: remuneração por disponibilidade, por acionamento e totalmente variável. A primeira diz respeito à remuneração que ocorre apenas para que o consumidor permaneça disponível para acionamento por parte do operador caso seja demandado. As outras dizem respeito à remuneração em caso de acionamento do consumidor que pode ocorrer a um valor fixo pré-determinado ou a um preço variável. Destaca-se que um mesmo produto pode ser remunerado por disponibilidade e por acionamento ou por disponibilidade e totalmente variável.

- Remuneração “por disponibilidade” (preço e montante fixos). O consumidor recebe um valor proporcional à capacidade máxima que é colocada à disposição do operador para acionamentos futuros, independentemente de o operador escolher acionar a resposta da demanda ou não.
- Remuneração “por acionamento” (preço fixo e montante variável). A cada vez que o consumidor é acionado, ele recebe um valor por MWh para cobrir os seus custos de oportunidade.
- Remuneração totalmente variável (preço variável “por acionamento”). O consumidor também recebe uma remuneração por acionamento que corresponde às condições do sistema no momento que o agente é acionado (ou seja, se o consumidor for acionado em um momento particularmente crítico para o sistema, ele pode receber ainda mais).

2.3.2 Definição de linha de base

Outra dimensão que não se encaixa na classificação por flexibilidade é a definição da linha de base, necessária em desenhos de mecanismo em que a remuneração do consumidor depende da diferença observada entre a demanda efetivamente exercida e um nível de demanda de referência (a chamada “linha de base”). A linha de base cumpre o propósito de determinar um consumo de energia de referência do ofertante, usado como parâmetro a partir do qual é calculada a redução de consumo.

A linha de base pode ser calculada de diferentes formas, das quais se destacam três principais, como apresentado a seguir. A primeira possibilidade é através da média móvel para determinado número de dias, tipicamente excluindo datas de consumo excepcional, como finais de semana e feriados ou outliers. Enquanto essas regras podem conter pequenas variações, outra categoria de linha de base seria a partir de estimações mais sofisticadas, como utilizar séries temporais para o cálculo. Por fim, há ainda a possibilidade de um modelo que não leva em consideração uma linha de base, mas remunera de maneira proporcional ao custo evitado.

- a. Média móvel. Linha de base para validação da entrega baseada no consumo médio de alguns dias ou semanas antes do acionamento (com diferentes critérios para incluir ou excluir diferentes datas na amostra em função da aplicação).
- b. Sem linha de base. Nestes casos, em geral a “remuneração” pela resposta da demanda é proporcional ao custo evitado de compra de energia, não sendo necessário um cálculo explícito do montante acionado.
- c. Métodos alternativos mais sofisticados. Engloba diferentes possíveis metodologias para estimar a linha de base por meio de estimativas (diferente de uma média móvel simples).

2.3.3 Duração do compromisso

Esta dimensão se refere ao tempo que o consumidor fica sujeito à necessidade de suprir o operador com redução de consumo. Uma duração do compromisso mais longa dá mais previsibilidade de receitas para o agente ofertante, mas também significa que ele deve ter a capacidade de se comprometer a entregar um produto resposta da demanda em um ciclo mais curto.

A Tabela 2 apresenta uma proposta de interpretação para a categorização desta dimensão segundo a “escala” de flexibilidade. Nota-se que foram omitidos dois níveis intermediários da escala (que podem ser interpolados pelos níveis adjacentes).

2.3.4 Antecedência do acionamento

Essa classificação se refere ao tempo de antecedência que o consumidor tem para que possa orquestrar sua resposta, ou seja, é o tempo entre o operador sinalizar a necessidade de acionamento e este realmente acontecer.

A Tabela 3 apresenta uma proposta de interpretação para a categorização desta dimensão segundo a “escala” de flexibilidade. Nota-se que foram omitidos dois níveis intermediários da escala (que podem ser interpolados pelos níveis adjacentes).

Tabela 2 – Classificação da dimensão “duração do compromisso”.

	10 anos ou mais	Contrato de muito longo prazo
	1 a 6 meses	Compromissos de duração de alguns meses ou estações do ano.
	Até 1 dia	Compromissos renegociados com alta frequência (por exemplo, mercado do dia seguinte)

Tabela 3 – Classificação da dimensão “antecedência do acionamento”.

	Contratual	Ao firmar o contrato o consumidor já sabe quando será acionado (por exemplo, há um perfil tarifário fixo)
	1 dia	Por volta de 24 horas antes, o consumidor é informado se seu produto de resposta da demanda será acionado
	Segundos	O acionamento se dá no curtíssimo prazo (resposta da demanda com característica de serviço ancilar)

2.3.5 Duração máxima do acionamento

Se refere ao máximo período de tempo que o operador pode solicitar que o consumidor passe reduzindo seu consumo.

A Tabela 4 apresenta uma proposta de interpretação para a categorização desta dimensão segundo a “escala” de flexibilidade. Nota-se que foram omitidos dois níveis intermediários da escala (que podem ser interpolados pelos níveis adjacentes).

2.3.6 Frequência máxima do acionamento

Se refere ao limite de vezes que o operador pode acionar o consumidor por um determinado período. Nota-se que a frequência do acionamento está muito ligada ao limite de tempo que o recurso pode passar acionado (que corresponde à dimensão de duração máxima do acionamento apresentado anteriormente).

A Tabela 5 apresenta uma proposta de interpretação para a categorização desta dimensão segundo a “escala” de flexibilidade. Nota-se que foram omitidos dois níveis intermediários da escala (que podem ser interpolados pelos níveis adjacentes).

2.3.7 Frequência das penalidades

Esta dimensão se refere a uma filosofia geral para a aplicação de *penalidades* em caso de descumprimento do compromisso de resposta da demanda. Isto é, admitindo que o operador do sistema solicitou um acionamento dentro dos parâmetros acordados previamente (em termos de antecedência, duração e frequência máximas), mas que o agente *não entrega* a resposta da demanda nos termos acordados, o agente estaria sujeito a penalidades? Com que frequência e o quão severas?

É interessante notar que o desenho de mecanismo “intermediário” pode ser interpretado como a aplicação de “penalidades” frequentes (porém brandas) em função da quantidade de resposta da demanda efetivamente entregue. A partir desta classe de mecanismo “equilibrada”, pode-se identificar, por um lado, mecanismos que reduzem a exposição dos agentes em caso de desvios (tornando o mecanismo menos atrativo ao operador, que não pode contar com a resposta solicitada). Na outra direção, tem-se mecanismos que impõem penalidades mais severas e assimétricas (ou seja, bônus que os agentes recebem por entregar energia adicional quando acionados é menor do que a penalidade que recebem por entregar energia a menos), que fortalecem o compromisso mas aumentam a percepção de risco dos agentes.

Tabela 4 – Classificação da dimensão “duração máxima do acionamento”.

	Inferior a 15 minutos	Acionamentos de curta duração
	Entre 3 e 8 horas	Acionamentos de duração capaz de cobrir todo o período do horário de ponta
	Sem limite	Não há limite de duração explícito, ou este limite é a totalidade da duração do compromisso

Tabela 5 – Classificação da dimensão “frequência máxima de acionamento”.

	Até 5 por ano	Acionamentos garantidamente raros, poucas vezes ao ano
	Até 1 por mês	Até um acionamento por mês (ainda que raro na prática)
	Sem limite	Acionamentos podem ocorrer com a frequência que o operador julgar necessária

A Tabela 6 apresenta uma proposta de interpretação para a categorização desta dimensão segundo a “escala” de flexibilidade. Nota-se que foram omitidos dois níveis intermediários da escala (que podem ser interpolados pelos níveis adjacentes).

2.3.8 Restrição de participação

Esta dimensão se refere à identificação de quais agentes (ou classes de agentes) que podem ofertar resposta da demanda, uma vez que muitos modelos estabelecem restrições à participação no programa. O menor nível de restrição participativa nos programas de resposta da demanda permite a participação de qualquer tipo de consumidor, desde que ele possua um medidor adequado para calcular a redução de consumo energético de acordo com os critérios do programa. Podem existir ainda restrições em relação à quantidade de energia ofertada, fonte energética, nível de capitalização, entre outros elementos, a serem considerados na classificação.

A Tabela 7 apresenta uma proposta de interpretação para a categorização desta dimensão segundo a “escala” de flexibilidade. Nota-se que foram omitidos dois níveis intermediários da escala (que podem ser interpolados pelos níveis adjacentes).

Tabela 6 – Classificação da dimensão “frequência de penalidades”.

	Agente blindado de risco	Penalidades quase nunca ocorrem (em geral limitadas à ruptura do contrato)
	Intermediária	Liquidações financeiras frequentes, em geral pouco impactantes
	Sujeito a altas penalidades	Estabelecimento de critérios de tolerância e penalidades financeiras em caso de não-cumprimento

Tabela 7 – Classificação da dimensão “restrição de participação”.

	Apenas medidor	Nenhuma exigência a não ser ter um medidor adequado para produto de resposta da demanda
	Restrições brandas	A maior parte dos consumidores pode atender, mas restrito em função do tamanho, localidade, ou classe de consumo
	Extremamente restrito	Limitado a um número seleto de consumidores

2.4 Aplicação da metodologia em exemplos reais

2.4.1 Experiências internacionais

As classificações apresentadas na seção 2.3 foram aplicadas aos modelos de resposta da demanda analisadas no entregável 2, de experiências internacionais. O principal objetivo deste exercício é criar um paralelo com mecanismos reais e mapear as características presentes em seus diferentes tipos, auxiliando o entendimento das diferentes características de modelagem que devem ser consideradas na formulação de um produto de resposta da demanda a ser considerado no planejamento.

Na Tabela 8 é apresentada a classificação das experiências de acordo com os parâmetros apresentados. Vale ressaltar que algumas das dimensões de análise não foram especificadas para alguns dos mecanismos, em casos em que a informação acerca destes elementos de desenho não seja clara ou pública. Nestes casos, a célula correspondente se apresenta em branco.

Tabela 8 – Classificação de parâmetros de mecanismos de resposta da demanda.

País	Mecanismo	Tipo de remuneração	Linha de base	Duração compromisso	Antecedência acionamento	Duração máxima do acionamento	Frequência máxima do acionamento	Frequência das penalidades
EUA - CAISO	Demand Response Auction Mechanism	a+c	a					
EUA - CAISO	Emergency Load Reduction Program	b	a					
EUA - PJM	Resposta emergencial e os produtos de capacidade	a	a	NA				
EUA - PJM	Resposta econômica e os produtos energia	c	a					
França	Mercado de capacidade	c	c					
França	Mercado de energia (NEBEF)	b	c					
França	Mecanismo de balanceamento	b						
França	Programa de cargas interruptíveis	b						
Reino Unido	Leilões de capacidade	a	a					
Reino Unido	Firm Frequency Response (FFR)	a+b	a					
Reino Unido	Short Term Operating Reserves (STOR)	a	c					
Austrália	Mercado de curto prazo (RERT)	a+b	a					
Austrália	Por atacado (WDR)	b						

O tipo de remuneração mais comum entre os programas apresentados é a remuneração por acionamento, com preço fixo e montante variável, à medida que o consumidor é acionado pelo operador do sistema e ressarcido por seu custo de oportunidade. No entanto, outros tipos de remuneração são observados em países como os Estados Unidos, que possuem um programa cuja remuneração ocorre por disponibilidade, e na França, onde a remuneração varia de acordo com os dias de acionamento ou o resultado da redução da demanda. Programas com mais de um tipo de remuneração também podem existir.

Para que o operador saiba quanto solicitar de redução a cada ofertante e qual será a remuneração correspondente, é desejável que haja uma referência do consumo deste. Para tanto, usualmente é definida uma linha de base que funciona como referência para a medição das quantidades a serem reduzidas. As experiências internacionais apontam que o modelo mais utilizado para estipular este parâmetro é a média móvel (consenso nos Estados Unidos, por exemplo), no entanto, há também outros métodos alternativos mais sofisticados, como o modelo multiplicativo de decomposição de séries temporais e o retângulo de dois períodos de referência. Em alguns programas, os agentes têm a possibilidade de ofertar uma “demanda sensível a preços” sem a necessidade de estabelecer uma linha de base (já que a resposta da demanda é incorporada ao nível de demanda declarado em si).

Já o tempo de duração, pelo qual o consumidor fica sujeito a determinações do respectivo mecanismo, varia de acordo com o tipo de compromisso contratual adotado entre as partes envolvidas, podendo ser do curtíssimo prazo (da ordem de 1 dia) ao longo prazo (múltiplos anos). A exemplo deste último, há o mercado de capacidade da França cujos leilões garantem a remuneração por redução da demanda por sete anos. Outro exemplo que se destaca dentre as experiências internacionais são os leilões de capacidade do Reino Unido que, a depender do tipo de contrato (para empreendimentos novos, reformados e antigos), os prazos de duração destes são de 15, 3 e 1 anos, respectivamente. No outro extremo, tem-se o programa Short Term Operating Reserves (STOR) do Reino Unido, o montante a ser reduzido é ofertado pelos agentes no dia anterior à redução da demanda em um leilão, juntamente com o preço a ser remunerado por sua disponibilidade – sugerindo um compromisso de duração de 1 dia e um ciclo curto entre o envio das informações de resposta da demanda e a determinação pelo operador se haverá acionamento ou não.

A partir do momento em que recebe o aviso de acionamento, o ofertante possui um prazo para de fato responder, que é usualmente de um dia. Dessa forma, podemos verificar que, nestes casos, o tempo em que o ofertante fica sujeito às solicitações de redução da demanda é de um dia, período em que ele pode ou não atender. Existem também casos em que a solicitação do acionamento se dá no mesmo dia em que a redução precisa ocorrer, em que a antecedência pode variar de quatro horas a trinta minutos, ou até

mesmo cinco segundos antes do acionamento. Os países que apresentam este mercado de energia intraday são os Estados Unidos nos programas de PJM, a França no programa de cargas interruptíveis e em todos os programas avaliados no estudo de caso do Reino Unido.

Outras duas características mapeadas são (i) a duração máxima do acionamento, ou seja, o período máximo que o consumidor pode passar respondendo a solicitação de redução de demanda do operador, e (ii) a frequência máxima do acionamento, que limita a um número de vezes ou de horas em que o recurso pode permanecer acionado. A variação destes critérios entre os programas é alta, já que pode não haver um limite pré-estabelecido, assim como este pode ser rigoroso, concentrando o acionamento entre uma e dez horas até um montante máximo acumulado por determinado período. Em geral, quanto mais longa a duração do compromisso, mais relevante é o estabelecimento de limites na frequência e/ou duração dos acionamentos (enquanto compromissos de duração mais curta comumente não têm limites explícitos estabelecidos).

Além disso, conforme houver descumprimento do acordado entre as partes, os ofertantes de redução da demanda estão passíveis a aplicação de penalidades de acordo com a frequência que estes descumprimentos ocorrem, podendo ser raras e financeiramente impactantes, intermediárias ou frequentes e brandas. Neste contexto, há um consenso no mercado quanto as penalidades ocorrerem à medida que a resposta da demanda for insuficiente ao requerido pelo operador, que cobra o custo dos desvios. A única exceção se dá no programa de Resposta Econômica e os Produtos Energia do PJM, nos Estados Unidos, em que a penalidade ocorre quando há desvios significativos, ou seja, é rara e extrema para o consumidor.

Por fim, a última classificação de produto de resposta da demanda consiste na restrição de participação de agentes nos programas analisados, sendo a mais branda a exigência de determinado tipo de medidor para registro do consumo dos agentes ofertantes. Enquanto alguns programas especificam tecnologias necessárias aos medidores, outros delimitam a participação a grandes consumidores cujo ponto de conexão cumpra com determinados requisitos e condições de precisão como instrumento de política energética. A título de exemplo, o programa de Mercado de Capacidade na França limita a participação a agentes com emissões inferiores a determinado limite (o que na prática exclui a participação de consumidores que usem geradores a diesel e que sejam cargas interruptíveis), e o Mercado de Energia apenas permite a participação de ofertantes que possuam um certificado de capacidade de redução de carga de, no mínimo, 100kW [1]. Ademais, para ofertar energia como resposta da demanda tanto no CAISO quanto no PJM, nos Estados Unidos, é necessário obter uma certificação que traz suas próprias restrições, como capitalização mínima e convênio com a distribuidora responsável pela região em que atua.

2.4.2 Experiências brasileiras

A metodologia criada no Capítulo 2, além de aplicada para os produtos internacionais estudados, pode ser utilizada também para um maior entendimento dos produtos nacionais detalhados no Caderno 2. A partir desse detalhamento dos dois programas de resposta da demanda existentes do contexto brasileiro, denominados Programa Piloto de Resposta da Demanda e Redução Voluntária da Demanda, foi possível classificá-los de acordo com a flexibilidade para o operador, como determinado pelas dimensões estabelecidas no capítulo anterior. A Tabela 9 compila a aplicação da metodologia, trazendo um panorama completo das dimensões analisadas em relação aos produtos pertinentes.

Tabela 9 – Aplicação de metodologia à experiência brasileira.

Mecanismo	Tipo de remuneração	Linha de base	Duração compromisso	Antecedência acionamento	Duração máxima do acionamento	Frequência máxima do acionamento	Frequência das penalidades
Programa Piloto Resposta da Demanda	c	a					
Redução Voluntária da Demanda	c	a					

2.5 Uma análise do histórico de produtos de RD brasileiros

Em seguida, foi realizado o estudo do comportamento das indústrias brasileiras em resposta a esses mecanismos, com base nos históricos de acionamentos de ambos, e cuja importância se dá ao fornecer um entendimento das práticas de mercado, essenciais na elaboração da modelagem da resposta da demanda no planejamento. As conclusões absorvidas neste capítulo tangem quais segmentos industriais estão mais propensos a aderir um mecanismo de resposta da demanda, em quais montantes e percentuais de entrega efetiva, assim como os horários de preferência de cada um. Para isso, primeiramente, é necessário entender de que forma os produtos de resposta da demanda foram ofertados e acionados.

O Programa Piloto da Resposta da Demanda (PPRD) foi a primeira tentativa brasileira de implementar um mecanismo de resposta da demanda no âmbito industrial e, conforme a análise dos resultados disposta na Nota Técnica 045/2019 [2] da CCEE, conclui-se que o programa não obteve êxito. Isso ocorreu haja vista que apenas duas empresas aptas a participação, a Braskem e a Cimento Apodi, se cadastraram no programa e apenas a Braskem realizou ofertas ao operador.

Neste contexto, a Braskem se disponibilizou a reduzir a demanda em um dos dois acionamentos realizados, em que a resposta efetiva refletiu no mínimo de 90% do montante ofertado.

Já o mecanismo de Redução Voluntária da Demanda (RVD) foi criado para auxiliar no controle da demanda do Sistema Interligado Nacional (SIN) durante o período da crise hídrica enfrentada pelo Brasil no biênio 2020/2021, que causou impacto direto nos níveis de armazenamento dos reservatórios das usinas hidrelétricas e na potência de geração disponível no sistema. Nesse contexto, a Portaria Normativa nº 22/GG/MME [3] estabeleceu as diretrizes para que ofertas fossem apresentadas por indústrias com interesse de participar do programa a fim de receber uma compensação financeira pela redução do consumo.

Vale ressaltar que, ainda segundo a portaria, “as ofertas consistem em produtos com duração horária de quatro ou sete horas, lotes com volume mínimo de 5 MW por Submercado, para cada hora de duração da oferta, discretizados no padrão de 1 MW, preço em R\$/MWh, dia da semana e identificação do Submercado.”

Além disso, cada oferta deveria ser caracterizada pelo agente como (i) RVD terá uma geração própria atendendo à carga; (ii) redução por eficiência de processo produtivo; ou (iii) deslocamento da demanda, para que houvesse uma avaliação da previsão de carga por parte do ONS.

O padrão das ofertas consideradas pelos órgãos pode ser analisado na Tabela 10.

Tabela 10 – Produtos e grade horária do mecanismo de RVD (Adaptado de [4]).

Submercado	Mês	Produtos Padronizados - Dias Úteis								Grade Horária de Deslocamento					
		4 horas - Produto 1		4 horas - Produto 2		7 horas - Produto 3		7 horas - Produto 4		Deslocamento - Dia Útil		Deslocamento - Sábado		Deslocamento - Domingos e Feriados	
Sudeste	Setembro	13:00	17:00	18:00	22:00			14:00	21:00	00:00	09:00	00:00	17:00	00:00	18:00
	Outubro	13:00	17:00	18:00	22:00	10:00	17:00	14:00	21:00	00:00	09:00	00:00	17:00	00:00	18:00
	Novembro	13:00	17:00	18:00	22:00	10:00	17:00	14:00	21:00	00:00	09:00	00:00	17:00	00:00	18:00
	Dezembro	13:00	17:00	18:00	22:00			14:00	21:00	00:00	09:00	00:00	17:00	00:00	18:00
	Janeiro	13:00	17:00			10:00	17:00			00:00	09:00	00:00	18:00	00:00	18:00
Sul	Fevereiro	13:00	17:00			10:00	17:00			00:00	09:00	00:00	18:00	00:00	18:00
	Setembro	13:00	17:00	17:00	21:00	10:00	17:00	13:00	20:00	00:00	08:00	00:00	18:00	00:00	18:00
	Outubro	13:00	17:00			10:00	17:00			00:00	08:00	00:00	18:00	00:00	18:00
	Novembro	13:00	17:00			10:00	17:00			00:00	08:00	00:00	17:00	00:00	19:00
	Dezembro	13:00	17:00			10:00	17:00			00:00	10:00	00:00	10:00	00:00	19:00
Nordeste	Janeiro	13:00	17:00			10:00	17:00			00:00	09:00	00:00	18:00	00:00	19:00
	Fevereiro	13:00	17:00			10:00	17:00			00:00	09:00	00:00	19:00	00:00	19:00
	Setembro	13:00	17:00	09:00	13:00	10:00	17:00			00:00	08:00	00:00	18:00	00:00	18:00
	Outubro	13:00	17:00	09:00	13:00	10:00	17:00			00:00	08:00	01:00	18:00	03:00	18:00
	Novembro	13:00	17:00			10:00	17:00			00:00	08:00	02:00	18:00	03:00	18:00
Norte	Dezembro	13:00	17:00			10:00	17:00			01:00	09:00	04:00	18:00	05:00	18:00
	Janeiro	13:00	17:00	20:00	00:00	10:00	17:00			01:00	08:00	05:00	18:00	04:00	18:00
	Fevereiro	13:00	17:00	20:00	00:00	10:00	17:00			02:00	08:00	05:00	18:00	04:00	18:00
	Setembro	13:00	17:00	20:00	00:00					02:00	10:00	05:00	14:00	04:00	18:00
	Outubro	13:00	17:00	20:00	00:00					02:00	10:00	05:00	14:00	05:00	18:00
	Novembro	13:00	17:00	20:00	00:00					05:00	09:00	05:00	14:00	05:00	18:00
	Dezembro	13:00	17:00	20:00	00:00					04:00	10:00	05:00	14:00	05:00	18:00
	Janeiro	13:00	17:00	20:00	00:00					03:00	10:00	05:00	18:00	06:00	19:00
	Fevereiro	13:00	17:00	20:00	00:00					03:00	09:00	05:00	18:00	04:00	18:00

Apesar de o mecanismo de RVD ter sido suspenso pelo ONS devido à melhora dos níveis dos reservatórios das hidrelétricas e da garantia de suprimento até o final do ano de 2021, a CCEE publicou os relatórios com a lista de agentes e montantes contabilizados nos períodos em que o programa esteve ativo. Dessa forma, é possível extrair diversas análises e aprendizados do uso de resposta da demanda no país através dos dados das cargas participantes do mecanismo, bem como o atendimento aos despachos do ONS.

Estas análises foram seccionadas por segmento, para que haja maior clareza sobre o potencial de resposta de cada setor industrial para a redução de demanda. Logo, a Tabela 11 abaixo mostra a relação entre o número de empresas que aderiram ao mecanismo de RVD no Brasil nos meses de setembro e outubro de 2021 e o total de acionamentos realizados para cada segmento. A partir desta, podemos iniciar um estudo preliminar sobre o percentual de atendimento por setor aos acionamentos realizados pelo Operador de uma maneira que imprima a realidade do mecanismo, conforme observado na Figura 1.

Tabela 11 – Acionamentos por segmento industrial (Elaboração própria, dados de [5] e [6]).

Segmento	Total de Empresas	Total de Acionamentos
Minério	1	7
Alumínio	4	123
Cimento	4	175
Gases	5	323
Petroquímica	1	66
Aço	5	157
Metalurgia	5	81
Cobre	1	37
Alimento	7	359
Papel e celulose	3	231
Energia Elétrica	1	3

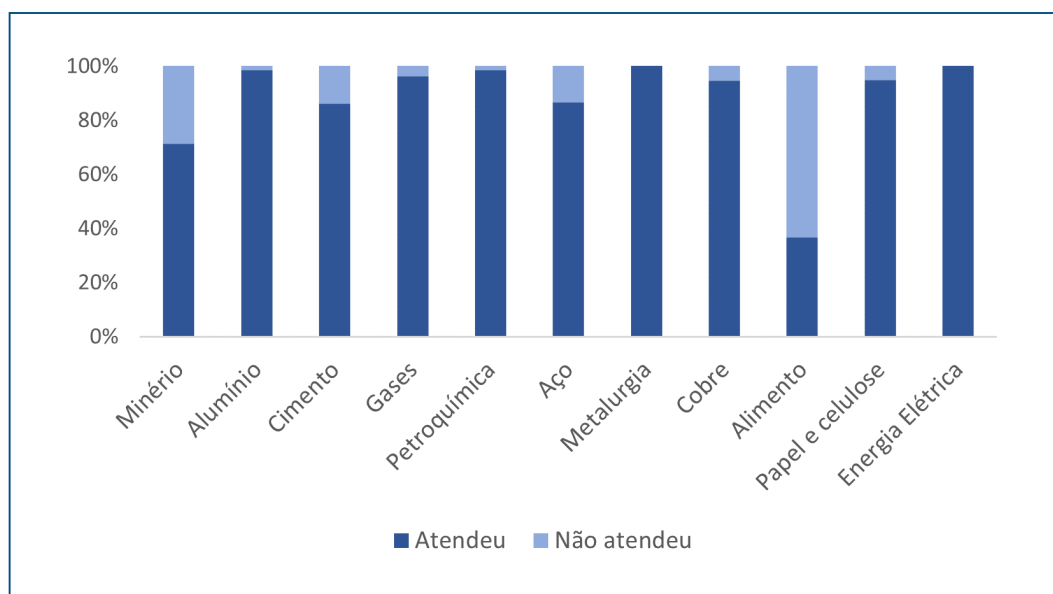


Figura 1 – Percentual de atendimento aos acionamentos por segmento (Elaboração própria, dados de [5] e [6]).

Conforme mencionado anteriormente, as ofertas eram dadas em montantes mínimos de 5 MW à medida que a empresa interessada em aderir ao mecanismo escolhia um dos quatro produtos disponíveis de quatro ou sete horas de duração. Assim, a Figura 2 expõe a média do montante (MW) ofertado por cada segmento para cada um dos produtos existentes.

A partir desta figura, podemos concluir que o interesse no produto 4, que obteve um pouco mais da metade de ofertas realizadas para o produto 1 (produto de maior interesse entre as indústrias que participaram do mecanismo).

Entretanto, isso se deu devido ao produto 1 estar disponível para todos os submercados nos dois meses em que o mecanismo esteve ativo, enquanto o produto 4 foi restrito a dois meses no Sudeste e a apenas setembro no Sul, estando vedado aos submercados Nordeste e Norte. Vale destacar, também, que em setembro o produto com menor montante médio de ofertas foi o 3.

Adicionalmente, após a oferta ser aceita pelo Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), o ONS deveria analisar a otimização do custo total de despacho do sistema e a segurança operativa, momento em que decidiria proceder ou não com a alocação do montante relativo à oferta de RVD.

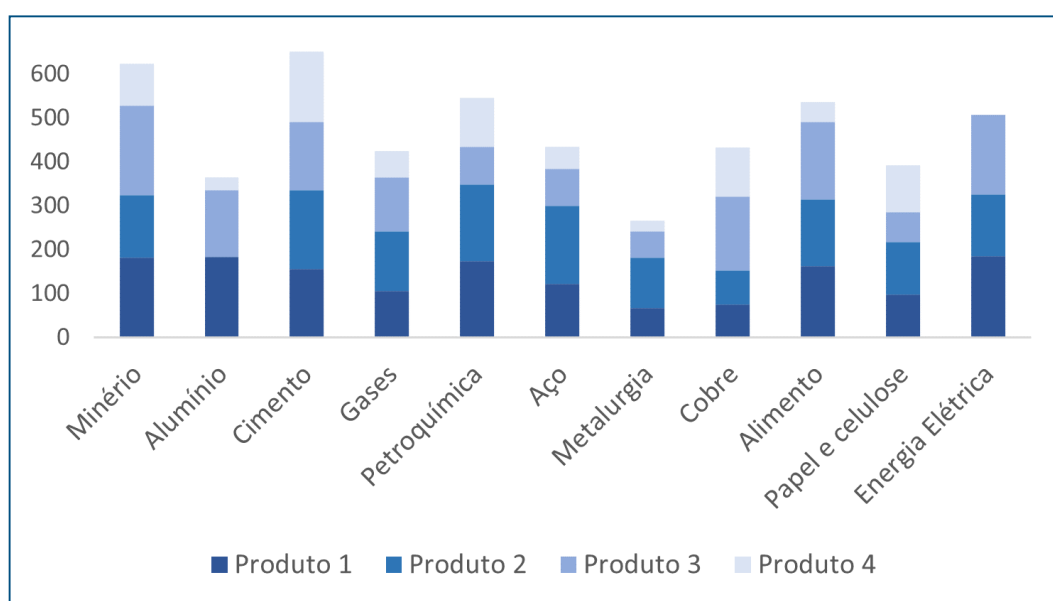


Figura 2 – Média de oferta em MW de cada segmento por produto (Elaboração própria, dados de [5] e [6]).

A partir disso, os acionamentos poderiam ser cumpridos ou não pelos agentes ofertantes, informação esta disponibilizada pela CCEE nos arquivos de contabilização do mecanismo como dados de sinalizadores de atendimento ao produto, conforme previsto nos artigos 12º e 13º da Portaria Normativa nº 22/GG/MME.

Um segundo estudo realizado a partir destes dados foi o montante efetivamente reduzido por cada um dos produtos. Vale destacar que o montante de fato reduzido não depende apenas do cumprimento do montante acionado, pois, para ser considerado como atendido e receber a remuneração proposta, o agente participante deveria atender ao menos 80% da redução orientada, ainda que tivesse apresentado alguma redução. Logo, a fim da compreensão da resposta industrial ao mecanismo, é válido considerar também os montantes reduzidos que não atingiram o mínimo declarado, sendo assim, a Figura 3 traz os valores consolidados de redução em MWh independentemente de terem sido considerados como atendidos pelo Operador.

Por fim, a última análise extraída dos dados divulgados pela CCEE diz respeito à tendência de horário das indústrias a reduzirem sua demanda. Em ambos os meses em que o mecanismo esteve ativo, houve uma preferência dos agentes pelo horário da tarde com pico de redução sendo às 15h, um retorno ao aumento do consumo às 18h com subsequente queda, em que a resposta pela redução da demanda se mantém até às 21h, como ilustra a Figura 4.

Logo, a partir do detalhamento dos dois programas de resposta da demanda existentes do contexto histórico brasileiro, é possível analisar o comportamento das indústrias brasileiras nestes mecanismos e sua importância ao fornecer um entendimento das práticas do mercado para a elaboração de um modelo fixo de resposta da demanda nacional. As conclusões absorvidas neste capítulo tangem quais segmentos industriais estão mais propensos a aderir um mecanismo de resposta da demanda, em quais montantes e percentuais de entrega efetiva, assim como os horários de preferência de cada um.

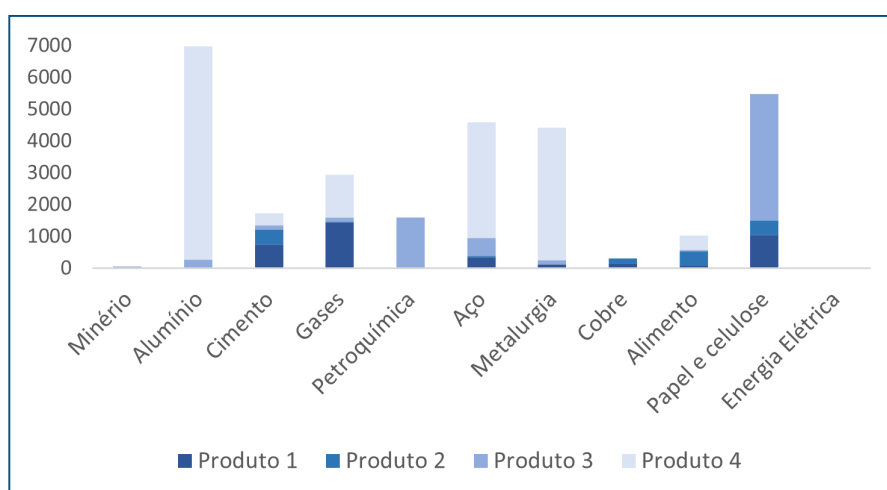


Figura 3 – Montantes efetivamente reduzidos por produto em MWh (Elaboração própria, dados de [5] e [6]).

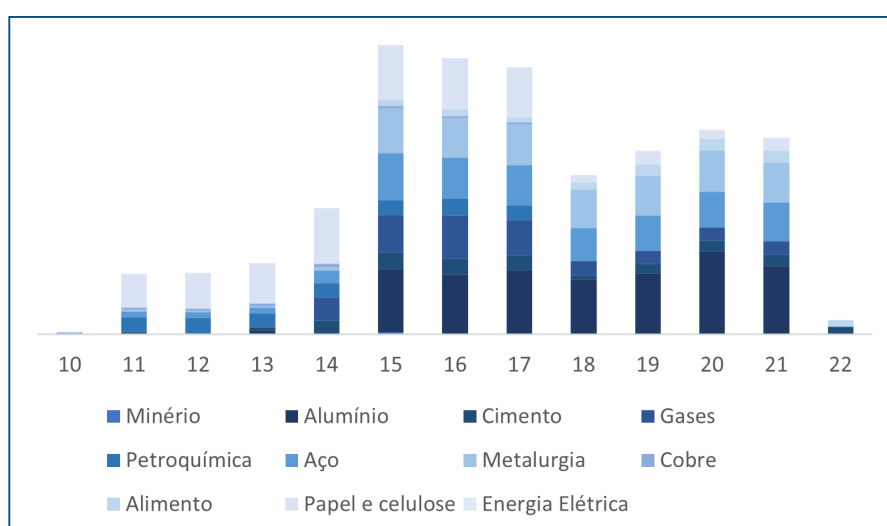


Figura 4 – Montante reduzido por hora no RVD (Elaboração própria, dados de [5] e [6]).

3. Propostas de modelagem de RD para o SEB

De posse das experiências internacionais e análises quanto aos parâmetros necessários para caracterização de um mecanismo de resposta da demanda, neste capítulo serão propostos produtos de resposta da demanda que servirão como base para a avaliação do potencial da indústria Brasileira em participar de eventuais programas. Como detalhado no capítulo 2, para a caracterização completa destes produtos é importante defini-los em cada uma das diferentes “dimensões” apresentadas anteriormente.

Evidentemente, há uma ampla gama de outros produtos de resposta da demanda que poderiam ser explorados (como ilustrado pelas diferentes escolhas de desenho que podem ser feitas em cada uma das dimensões do produto). Entretanto, o objetivo dos consultores foi identificar alguns produtos “canônicos” mais adaptados ao contexto brasileiro e representativos dos produtos que mais provavelmente tenderiam a ser de interesse – ainda que qualquer alteração nos elementos de desenho em alguma das dimensões apresentadas anteriormente pudesse impactar os resultados finais da análise.

Vale destacar ainda que, de modo a aproximar a proposta de produtos de resposta da demanda à realidade brasileira, foram levadas em conta nesta análise também as caracterizações preliminares dos consumidores industriais potencialmente participantes no programa, conforme explorado no capítulo 4. Esta análise preliminar foi fundamental para assegurar uma definição coerente dos produtos de RD mais relevantes para o sistema brasileiro, e a definição concreta dos produtos de RD de interesse por sua vez é importante para o aprofundamento da caracterização dos consumidores de diferentes segmentos industriais (que será apresentado no Relatório 4).

Com este intuito, foram desenhados as seguintes principais categorias de produtos relevantes para um programa de resposta da demanda adequado às necessidades do sistema brasileiro:

- O primeiro conjunto se relaciona a produtos de resposta da demanda com característica de curto prazo, muito flexível em termos de disponibilidade e acionamento.
- Entre os produtos de resposta da demanda com característica de mais longo prazo (representando um compromisso com o qual o operador poderia ser capaz de contar), torna-se importante estabelecer alguns limites às características do acionamento da resposta da demanda – pelo qual fazemos uma subdivisão adicional em duas classes de produto: um com características mais voltadas ao acionamento na

ponta e outro com características mais voltadas ao acionamento em períodos mais longos (em situações de hidrologia mais crítica).

3.1 Produto resposta de curto prazo

3.1.1 Resposta simples aos preços de curto prazo

A versão mais simples da implementação de um programa de resposta da demanda é por meio da resposta simples a preços, onde o agente responde a um sinal de preços apenas deixando de consumir (como explorado na seção 2.2). Nota-se que esse mecanismo básico já funciona no próprio mercado atual de energia – de modo que uma participação voluntária dos agentes já poderia ocorrer de forma imediata.

Esta possibilidade de resposta dos agentes vem do fato de que o preço de curto prazo é informado *ex ante*, mas as liquidações de mercado são baseadas em medições *ex post*, de modo que o agente tem tempo suficiente para observar o sinal de preços antes de determinar sua estratégia de reduzir ou não o seu nível de consumo (evitando pagar o preço de curto prazo da eletricidade proporcionalmente à redução da demanda). O Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) é calculado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) diariamente para cada hora do dia seguinte e para cada submercado. Este cálculo é realizado por modelos computacionais (Newave, Decomp e Dessem) tem como base o Custo Marginal de Operação (CMO), mas considera a aplicação dos limites máximos (horário e estrutural) e mínimo vigentes⁴. Podemos então pressupor que os agentes, em posse da curva de preços do dia seguinte, já poderiam se planejar no dia anterior para deixar de consumir em determinados momentos de preços elevados.

No entanto, o limite máximo do PLD limita também os ganhos que o agente pode auferir neste mercado, o que representa uma limitação importante ao mecanismo. Se comparados com o custo de oportunidade do agente que poderia estar reduzindo sua demanda para atender

4 Para o ano de 2022, o PLD piso é de R\$ 55,70/MWh, o PLD máximo estrutural é de R\$ 640,50/MWh e o PLD máximo horário é de R\$ 1.314,02/MWh.

a restrição naquele momento e até o custo ao CVU de algumas usinas e o valor que o sistema acaba dispendendo em determinados momentos, o limite máximo do PLD corresponde a um valor consideravelmente mais baixo, que pode não justificar a implementação de iniciativas de resposta da demanda. A aplicação do PLD teto, portanto, desincentiva a gestão da energia com essa finalidade, o que exigiria um planejamento refinado de energia da indústria.

Para estimular a participação dos agentes nesse mercado, seria possível introduzir um mecanismo que remunerasse os agentes pela diferença entre CMO e PLD como incentivo adicional, que potencialmente remuneraria de forma mais adequada o custo de oportunidade do agente e poderia trazer maior incentivo a sua participação ofertando a redução de demanda neste mercado. Nota-se que, embora não fosse justificável de um ponto de vista do ótimo social uma remuneração do produto resposta da demanda a um preço acima do CMO, nota-se que o CMO representa o custo marginal do sistema de fato (representando o benefício de evitar o acionamento de uma térmica cara ou de manter um nível maior de armazenamento em uma hidrelétrica valiosa), de modo que esse pagamento adicional não representaria perdas do ponto de vista sistêmico.

Embora o PLD teto seja um dos principais obstáculos à disseminação deste tipo de resposta voluntária da demanda atualmente, ainda que fossem feitas reformas que permitissem o fortalecimento desse sinal de preços (como descrito anteriormente) ainda restariam alguns obstáculos à disseminação efetiva deste programa. Em primeiro lugar, haveria obstáculos associados às práticas contratuais de alguns consumidores industriais – já que muitos desses agentes são representados com comercializadoras e possuem contratos com cláusulas que minimizam a sua exposição ao risco do PLD. Este tipo de contrato implica que os consumidores efetivamente não percebem o sinal de preços do sistema na margem, o que pode eliminar os incentivos a uma atuação estratégica desse tipo.

Outra ressalva está na assimetria do tratamento proposto para o fortalecimento do sinal de preços para a resposta da demanda, o que pode levar a distorções. Na prática, um agente que reduzir a sua demanda seria remunerado de acordo com o CMO, ao passo que um agente que aumentar a sua demanda teria um sobrecusto aplicado de acordo com o PLD máximo. Essa diferença de tratamento pode levar a comportamentos estratégicos indesejáveis por parte dos agentes, exigindo um monitoramento cuidadoso.

3.1.2 Resposta de curto prazo despachável

Apresentamos anteriormente um mecanismo “em duas etapas”, já aplicável na estrutura de mercado atual do sistema brasileiro, segundo o qual (i) primeiro o operador determina os sinais de preços e (ii) em seguida os

consumidores tomam a decisão de reduzir o seu consumo ou não. Evidentemente, este mecanismo possui uma fragilidade que é o fato de que o operador não consegue utilizar a informação de qual a resposta esperada do agente para refinar a sua decisão de despacho e cálculo do custo marginal.

Um mecanismo alternativo poderia envolver o tratamento da demanda como uma “térmica despachável” com CVU pré-determinado, que representa o custo de oportunidade de reduzir a demanda naquele momento. Em uma visão otimista podemos considerá-la equiparável a uma geração totalmente flexível, e, portanto, capaz de entregar os mesmos produtos ao sistema (energia, lastro etc.). Esta é a modalidade mais valiosa de resposta da demanda para o operador: 100% despachável, sempre em linha com as necessidades do sistema (a resposta da demanda é acionada se e somente se o CMO for maior que o custo de oportunidade). Para isto, entretanto, seria necessário que os agentes participantes do programa de resposta da demanda fizessem ofertas críveis no mercado de curto prazo, que o operador pudesse utilizar como referência para determinar quantidades “despachadas” e prever acuradamente o consumo efetivo do agente em função dessa decisão de despacho. Para isto, é necessário que os agentes tenham incentivos corretos para submeter ofertas críveis.

Um obstáculo para que as ofertas dos agentes participantes do programa de resposta da demanda possam ser consideradas críveis é o fato de que o agente sempre pode realizar ajustes *ex post* no seu montante consumido (para cima ou para baixo), com impacto financeiro dado pelo PLD horário calculado *ex ante* (como detalhado na seção 3.1.1). Consequentemente, para que o incentivo seja coerente, é necessário introduzir um mecanismo adicional, que não esteja disponível para um agente que simplesmente ajuste a sua produção *ex post* – como por exemplo, um mecanismo que permita que o agente seja remunerado pela resposta da demanda a um custo acima do valor máximo do PLD (novamente, como explorado na seção 3.1.1).

De fato, os mecanismos de resposta da demanda aplicados até hoje no mercado elétrico brasileiro tiveram essa característica – envolvendo a introdução de incentivos para que os agentes consumidores fizessem declarações *ex ante* da sua disposição a oferecer um produto resposta da demanda ao sistema (em termos de preços e quantidades). Mais especificamente, os produtos resposta da demanda do mercado brasileiro (explorados na seção 2.5) tiveram característica mais focada nos *ajustes operativos intradiários* – de forma separada, portanto, da otimização de mercado que resulta na formação de preços.

Aplicando as classificações da metodologia proposta na seção 2.3 a esse produto, teríamos a classificação de cada parâmetro dada de acordo com a Figura 5.

Mecanismo	Tipo de remuneração	Linha de base	Duração compromisso	Antecedência acionamento	Duração máxima do acionamento	Frequência máxima do acionamento	Frequência das penalidades
Produto Resposta de Curto Prazo	Variável	Sem linha de base	Um dia	Um dia 	Um dia 	Sem limites 	Muito frequente 

Figura 5 – Produto Resposta de Curto Prazo (Elaboração própria).

3.2 Contrato de longo prazo

Este trabalho sugere dois produtos adicionais correspondendo a contratos de longo prazo, representando as duas principais “categorias” de produto que ao mesmo tempo seriam (i) de interesse para o operador (isto é, relevantes para atender a um desafio real que pode surgir ao longo da operação do sistema elétrico brasileiro) e (ii) razoavelmente aceitáveis do ponto de vista dos consumidores industriais, fazendo concessões às suas limitações técnicas e financeiras. São eles:

- Um produto “potência” (ou “demanda de ponta”), representando acionamentos de curta duração para atendimento à ponta;
- Um produto “energia” (ou “demanda média”), representando acionamentos mais flexíveis para redução da demanda média em situações de hidrologia ruim.

Nesse modelo de contratos de longo prazo, a indústria teria uma obrigação de ofertar determinadas quantidades mínimas de redução de demanda e estaria exposta a penalidades caso não cumpra com os requisitos mínimos acordados.

A diferença principal entre os dois produtos está relacionada ao seu acionamento: enquanto o primeiro é feito diariamente visando atender restrições de demanda de ponta, o segundo é feito semanalmente e tem como principal resultado a atendimento de uma redução média de demanda no período.

Nas próximas subseções, apresentaremos uma recomendação de elementos de desenho para estes produtos, utilizando as dimensões apresentadas na seção 2.3 que podem ser usadas para caracterizar o produto. Nota-se que nenhuma dessas recomendações é estritamente necessária para o bom funcionamento do mecanismo – como explorado no capítulo 2, há uma ampla variedade de desenhos de resposta da demanda possíveis, que poderão ser exploradas em mais detalhe em trabalhos futuros.

O principal objetivo desta discussão é apresentar uma caracterização completa das características fundamentais dos produtos, de modo que uma análise mais detalhada possa ser feita em relatórios futuros (em particular, no Relatório 1, que envolve a modelagem do sistema com diferentes níveis de penetração de cada produto resposta da demanda).

3.2.1 Elementos de desenho em comum

Inicialmente, pode-se estabelecer alguns princípios gerais que podem aplicar-se a ambos os produtos – tanto para o produto demanda de ponta quanto para o produto demanda média.

Justamente por representarem uma solução com natureza de contrato de longo prazo (em contraste com os produtos de resposta de curto prazo discutidos na seção 3.1), entende-se que os contratos para ambos os produtos devem envolver uma *duração do compromisso* mais longa, da ordem de 1 a 5 anos. A duração mais longa é desejável tanto do ponto de vista do operador, que tem mais segurança de que poderá contar com a disponibilidade do recurso de resposta da demanda; quanto do ponto de vista dos agentes, que podem planejar investimentos de mais longo prazo para acomodar a resposta da demanda devido à garantia de remuneração por um período mais longo.

No que diz respeito à remuneração dos agentes, os consultores recomendam a determinação de uma *remuneração por disponibilidade*: isto é, um pagamento fixo proporcional ao montante de produto resposta da demanda colocado à disposição do operador do sistema nesses contratos, independentemente do número de acionamentos. Nota-se que, além deste pagamento fixo, o agente (evidentemente) não precisaria pagar o custo de compra de energia nas horas em que o produto resposta da demanda é acionado.

Por exemplo, um agente que tipicamente consome 100 MW é acionado para reduzir a sua demanda em 60 MW e de fato o faz, de modo que só precisaria comprar o equivalente a 30 MW no mercado *spot* ou no mercado de contratos (e, caso o agente consumidor tenha adquirido um contrato pelo montante fixo de 100 MW, ele poderia vender o excesso no mercado de curto prazo, recuperando um custo equivalente ao PLD). Devido a essa característica, ao menos parte do custo de oportunidade do consumidor para a provisão de resposta da demanda pode ser “recuperado” a cada acionamento – e, ainda que o custo de oportunidade do consumidor seja mais alto (em particular quando o custo de ser acionado é mais caro do que o PLD-teto), este sobrecusto pode ser incorporado à remuneração por disponibilidade requisitada pelo agente consumidor. Por exemplo, se um consumidor estima que ele terá uma perda de 800 R\$/MWh a cada vez que é acionado (ou seja, o seu custo de oportunidade é 800 R\$/MWh mais caro do que o PLD-teto), e se ele estima que será acionado com uma frequência e duração correspondente a 200 horas por ano, ele deverá incorporar este custo, equivalente a 160 R\$/kW.ano, à sua oferta de remuneração por disponibilidade (adicionalmente a quaisquer custos fixos dessa oferta).

No que diz respeito à *definição de linha de base*, recomenda-se utilizar o mesmo princípio geral aplicado nos programas de resposta da demanda brasileiros até hoje – isto é, uma linha de base fundamentalmente guiada por um critério de média móvel aplicado às medições históricas.

Já no que diz respeito à *frequência de penalidades*, entende-se que será necessário estabelecer um critério mais rigoroso para penalizar o agente em caso de não-cumprimento com os requisitos estabelecidos em contrato. Os programas de resposta da demanda aplicados no Brasil até hoje têm implicado em penalidades muito brandas caso os agentes não sejam capazes de fornecer a resposta da demanda em tempo real após terem sido acionados pelo operador – não havendo, em particular, nenhuma penalidade financeira aos agentes. Com estas características, entretanto, o operador não poderia contar com a firmeza do compromisso dos agentes ao determinar ajustes à operação física do sistema. Na visão dos consultores, a imposição de penalidades mais firmes para produtos de resposta da demanda no formato de contrato de longo prazo é coerente com a proposta de introdução de um mecanismo de pagamento por disponibilidade de RD – visto que os agentes estão sendo remunerados pela sua disponibilidade, é natural que eles percam este benefício (reduzindo a sua remuneração e eventualmente tornando-a negativa em caso de descumprimentos muito elevados) caso falhem em entregar a disponibilidade comprometida.

Em termos de *restrição de participação*, visto que esta é uma decisão mais associada a critérios estratégicos e de política energética do que técnicos, optou-se por não estabelecer nenhuma recomendação no que diz respeito a restringir a gama de participantes potenciais. Embora o foco do presente trabalho esteja nos 8 setores industriais detalhados no capítulo 4, nada impede que o programa de resposta da demanda possa ser estendido a outros consumidores em potencial – da mesma forma que nada impede que a participação no programa seja mais restrita (por exemplo, limitada a determinada região geográfica – como foi feito no Programa Piloto).

Restam, portanto, as dimensões de *antecedência do acionamento*, *frequência máxima do acionamento*, e *duração máxima do acionamento* – que serão discutidas individualmente para cada um dos produtos a seguir.

3.2.2 Produto Demanda de Ponta

O Produto Demanda de Ponta tem como principal característica o atendimento de ponta do sistema e, para tanto, precisa de um acionamento de curto prazo feito pelo operador, visando a redução de demanda em horas específicas do dia seguinte.

A recomendação é que a decisão de acionamento seja feita no dia seguinte (o que deve ser informado pelo operador aos agentes participantes), e que esteja limitada a um pequeno número de horas por dia – a título de exemplo, utilizou-se um período de 3 horas. O operador deve ser capaz de selecionar em que horas a demanda deve ser reduzida, de modo a atender às necessidades compatíveis com o atendimento à ponta (levando em conta que os momentos mais críticos para o sistema podem ocorrer em diferentes horários em função do uso de ar-condicionado, horário de ponta regulatório e comportamentos estratégicos dos consumidores, nível de penetração de geração solar, e outras características). Além disso, de modo a dar mais previsibilidade ao produto, recomenda-se que seja estabelecido um limite de acionamentos, como por exemplo um máximo de 48 acionamentos por ano (correspondente a aproximadamente 4 dias por mês em que a demanda do consumidor poderia ser reduzida para atendimento à ponta).

Como introduzido anteriormente, a indústria participante terá remuneração por disponibilidade adicionada a uma remuneração variável por acionamento. Uma vez que há a remuneração por disponibilidade, há também penalidades associadas à não entrega do montante acordado.

As características principais do produto podem ser observadas na Figura 6.

Mecanismo	Tipo de remuneração	Linha de base	Duração compromisso	Antecedência acionamento	Duração máxima do acionamento	Frequência máxima do acionamento	Frequência das penalidades
Produto Demanda Ponta	Disponibilidade + acionamento	Média móvel	2 anos	Um dia	Até 3 horas	Um por dia (até 48 acionamentos por ano)	Frequente

Figura 6 – Produto Demanda Ponta (Elaboração própria).

3.2.3 Produto Demanda Média

O Produto Demanda Média tem como principal característica a redução da demanda média em um determinado período. Neste caso, a proposta é que o produto seja entregue e verificado dentro de uma semana. Logo, a indústria ofertante teria um determinado compromisso de redução de energia e poderia se programar para executar a redução do montante negociado da forma que melhor lhe convier dentro deste período.

O acionamento seria realizado *semanalmente* pelo operador de acordo com avaliações feitas sobre as necessidades do sistema para o período – consequentemente, o tempo de antecedência para o acionamento seria mais longo do que no caso do produto demanda de ponta. Adicionalmente, visto que do ponto de vista do operador o que importa é reduzir a demanda média de determinado período de modo a preservar o armazenamento nos reservatórios do sistema, é possível conceder mais flexibilidade ao agente no que diz respeito a como essa redução de demanda é distribuída ao longo das horas da semana. Isto pode ser alcançado por meio do mecanismo de penalidades implementado – por exemplo, levando em conta a demanda agregada da semana no lugar da demanda horária para averiguar se houve cumprimento do compromisso por parte do agente ofertante.

Pode-se traçar um paralelo entre o despacho do produto demanda média com estas características e o mecanismo atualmente vigente no Brasil para despacho antecipado de térmicas a GNL. Assim como no mecanismo de despacho antecipado, há incerteza da necessidade real desse recurso quando a decisão é tomada baseada em uma expectativa do operador. No caso das térmicas a GNL, o despacho é feito com dois meses de antecedência, e o consumidor arca com os riscos associados ao erro de previsão:

- Caso a contratação seja maior do que a que de fato foi necessária para o sistema, ou seja, a térmica é solicitada a despachar e no mês $t+2$ seu despacho não é mais necessário: o consumidor paga o custo variável da usina quando poderia comprar energia mais barata no mercado de curto prazo ($PLD < CVU$, por definição);
- Caso a contratação seja menor do que a que de fato foi necessária para o sistema, ou seja, a térmica não é solicitada a despachar e no mês $t+2$ seu despacho é necessário: o consumidor compra no mercado de curto prazo uma energia que é mais cara que o custo variável da usina ($PLD > CVU$, por definição).

Situação similar ocorreria com esse produto de resposta da demanda. A contratação inevitavelmente ocorrerá a maior ou a menor em relação a necessidade real do sistema. No entanto, o recurso é importante como mais uma ferramenta para auxiliar no equilíbrio do sistema. Vale destacar que, quanto menor o intervalo de tempo entre o despacho e a entrega do produto, maior é a probabilidade de a projeção ficar mais próxima do cenário real.

Por construção, sob o paradigma proposto, cada acionamento teria uma duração de 1 semana (com flexibilidade de despacho intra-semanal). Adicionalmente, de modo a dar mais previsibilidade aos agentes consumidores industriais, é desejável que seja imposto um limite de acionamentos. Recomenda-se que este limite seja da ordem de 8 acionamentos por ano, o que representa um total de 2 semanas por trimestre nas quais os agentes teriam que reduzir a sua demanda média para cumprir com o compromisso do produto.

As características principais do produto podem ser observadas na Figura 7.

Mecanismo	Tipo de remuneração	Linha de base	Duração compromisso	Antecedência acionamento	Duração máxima do acionamento	Frequência máxima do acionamento	Frequência das penalidades
Produto Demanda Média	Disponibilidade + acionamento	Média móvel	2 anos	Uma semana	Até uma semana	8 semanas por ano	Muito frequente

Figura 7 – Produto Demanda Média (Elaboração própria).

4. Aplicabilidade aos segmentos industriais de interesse

4.1 Metodologia

A análise detalhada dos diferentes segmentos industriais será objeto do entregável 4. Entretanto, é interessante fazer no âmbito do presente relatório um levantamento preliminar das informações disponíveis e do quão flexíveis cada um destes segmentos industriais poderia ser na oferta de produtos de resposta da demanda – o que contribuiu para a consolidação das características de produtos de resposta da demanda apresentados na seção 3.2.

O presente capítulo é organizado ao redor de 8 principais setores industriais selecionados para este trabalho (Aço, Alumínio, Cimento, Cloro, Papel, Alimentos, Saneamento e Data Centers). Para cada um destes segmentos, nas seções posteriores apresentaremos:

- Uma visão geral do setor em termos de características gerais, grandes números de produção nacional, e contextualização internacional;
- A identificação das principais empresas do setor e sua importância relativa, o que será relevante posteriormente para a identificação individual destas empresas com os dados de consumidores livres ligados à CCEE;

- Uma descrição do processo produtivo, em particular identificando as principais etapas ou tipos de planta que possam ter relevância para a análise;
- Uma descrição do uso da energia elétrica no segmento industrial, traçando paralelos entre o consumo de energia elétrica e os processos produtivos descritos anteriormente.

O estudo apresentado neste capítulo se dará a partir do levantamento prévio dos dados de consumo de eletricidade por setor industrial, em que será analisada sua participação no mercado brasileiro e sua relevância na redução da demanda por subsegmentos industriais. Logo, a Tabela 12 contém as informações deste consumo no Brasil em 2021.

O próximo passo deste trabalho (a ser apresentado no relatório 4) consiste em avaliar a operação dos equipamentos e processos mais relevantes em termos de consumo de eletricidade para cada setor industrial.

Assim, o objetivo é de analisar a capacidade de interruptibilidade total ou parcial, considerando aspectos como automação e criticidade para os negócios.

Tabela 12 – Consumo de energia elétrica por setor industrial no Brasil, em 2021 (Elaboração própria com dados de [15], [29], [37], [44], [52] e [62]).

Setor Industrial	Consumo (GWh)	Part. %
Metalurgia	43.613	24,4
Fabricação de Produtos Alimentícios	23.417	13,1
Fabricação de Produtos Químicos	19.024	10,6
Fabricação de Produtos de Minerais Não-Metálicos	14.547	8,1
Extração de Minerais Metálicos	12.531	7,0
Fabricação de Produtos De Borracha e de Material Plástico	9.974	5,6
Fabricação de Celulose, Papel e Produtos de Papel	8.937	5,0
Fabricação de Produtos Têxteis	6.712	3,8
Fabricação de Veículos Automotores, Reboques e Carrocerias	6.492	3,6
Fabricação de Produtos de Metal, Exceto Máquinas e Equipamentos	4.302	2,4
Fabricação de Produtos de Madeira	4.058	2,3
Extração de Minerais Não-Metálicos	3.634	2,0
Fabricação de Máquinas e Equipamentos	3.200	1,8
Fabricação de Bebidas	2.774	1,6
Demais classes	15.783	8,8

4.2 Indústria do aço

4.2.1 Visão geral

As siderúrgicas são as indústrias responsáveis pela transformação do ferro em aço. Esse segmento é bastante relevante na economia do país, pois o aço é utilizado como insumo em diversos subsetores da indústria de transformação, principalmente na construção civil e no setor de transporte. A cadeia produtiva geral da metalurgia e materiais metálicos contempla desde as empresas responsáveis pela extração e beneficiamento do minério de ferro, as siderúrgicas e as indústrias de transformados que geram os produtos de metais utilizados no dia a dia

[7][8]. Na Figura 8 é apresentada a visão geral da cadeia metalúrgica e produção de materiais metálicos.

Na Tabela 13 é apresentado o ranking mundial da produção de aço bruto por país, verifica-se que o Brasil é o 9º maior produtor de aço bruto do mundo. Em 2021, o país atingiu a produção de 36,2 milhões de toneladas desse produto, um crescimento de 13,25% em relação ao ano anterior, equivalente a 1,9% de toda produção mundial.

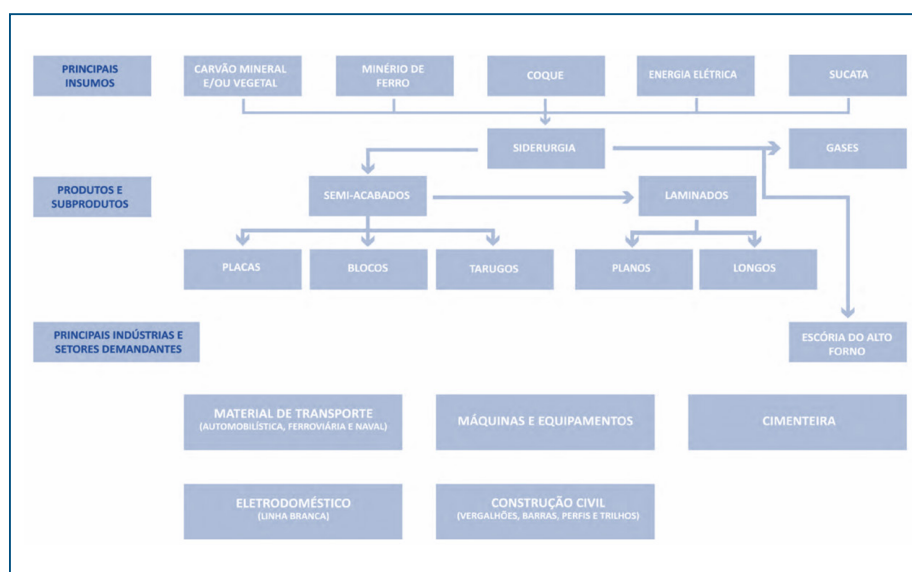


Figura 8 – Visão geral da cadeia metalúrgica e materiais metálicos (Adaptado de [9]).

Tabela 13 – Ranking mundial da produção de aço bruto por país, em 2021 [10].

Pais/ Country	2017	2018	2019	2020	2021 (*)	2021 (%)
China	870,7	929,0	995,4	1.064,7	1.032,8	52,9
Índia / India	101,5	109,3	111,4	100,3	118,2	6,1
Japão / Japan	104,7	104,3	99,3	83,2	96,3	4,9
EUA / USA	81,6	86,6	87,8	72,7	85,8	4,4
Rússia / Russia	70,5	72,1	71,7	71,6	75,6	3,9
Coreia do Sul / Rep. of Korea	71,0	72,5	71,4	67,1	70,4	3,6
Turquia / Turkey	37,5	37,3	33,7	35,8	40,4	2,1
Alemanha / Germany	43,3	42,4	39,6	35,7	40,1	2,1
Brasil / Brazil	34,8	35,4	32,6	31,4	36,2	1,9
Irã / Iran	21,2	24,5	25,6	29,0	28,5	1,5
Itália / Italy	24,0	24,5	23,2	20,4	24,4	1,3
Formosa / Taiwan	22,4	23,2	22,0	21,0	23,2	1,2
Vietnã / Vietnam	11,5	15,5	17,5	19,9	23,0	1,2
Ucrânia / Ukraine	21,4	21,1	20,8	20,6	21,4	1,1
México / Mexico	19,9	20,2	18,4	16,8	18,5	0,9
Indonésia / Indonesia	5,2	6,2	8,6	12,9	14,3	0,7
Espanha / Spain	14,4	14,3	13,6	11,0	14,2	0,7
França / France	15,5	15,4	14,4	11,6	13,9	0,7
Canadá / Canada	13,2	13,4	12,9	11,0	13,0	0,7
Egito / Egypt	6,9	7,8	7,3	8,2	10,3	0,5
Arábia Saudita / Saudi Arabia	4,8	8,2	8,2	7,8	8,7	0,4
Polônia / Poland	10,3	10,2	9,0	7,9	8,5	0,4
Áustria / Austria	8,1	6,9	7,4	6,8	7,9	0,4
Reino Unido / United Kingdom	7,5	7,3	7,2	7,1	7,2	0,4
Bélgica / Belgium	7,8	8,0	7,8	6,1	6,9	0,4
Malásia / Malaysia	3,2	4,1	6,9	6,6	6,9	0,4
Países Baixos / Netherlands	6,8	6,8	6,7	6,1	6,6	0,3
Austrália / Australia	5,3	5,7	5,5	5,5	5,8	0,3
Bangladesh / Bangladesh	3,5	3,8	5,1	5,5	5,5	0,3
Tailândia / Thailand	6,8	6,4	4,2	4,5	5,5	0,3
Outros / Other	79,8	84,2	80,1	71,6	81,9	4,2
TOTAL	1.735,1	1.826,6	1.875,3	1.880,4	1.951,9	100,0

(*) Dados preliminares./Preliminary figures.
Fonte/Source: worldsteel/ALACERO/Aço Brasil

A produção de aço bruto do país concentra-se na região Sudeste, com 87,1% da produção. Em segundo lugar está a região Nordeste com 9,8% da produção, seguida pelas regiões Sul e Norte, com participação de 2,1% e 1%, respectivamente. A distribuição percentual da produção de aço bruto do Brasil por região geográfica é apresentada na Figura 9.

Em termos de participação por união federativa na produção de aço bruto do país, conforme apresentado na Tabela 14, nota-se que os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo possuem uma participação conjunta de mais 78% da produção. O restante encontra-se fracionado entre os estados de São Paulo, Ceará, Rio Grande do Sul, Pará, Maranhão e Pernambuco.

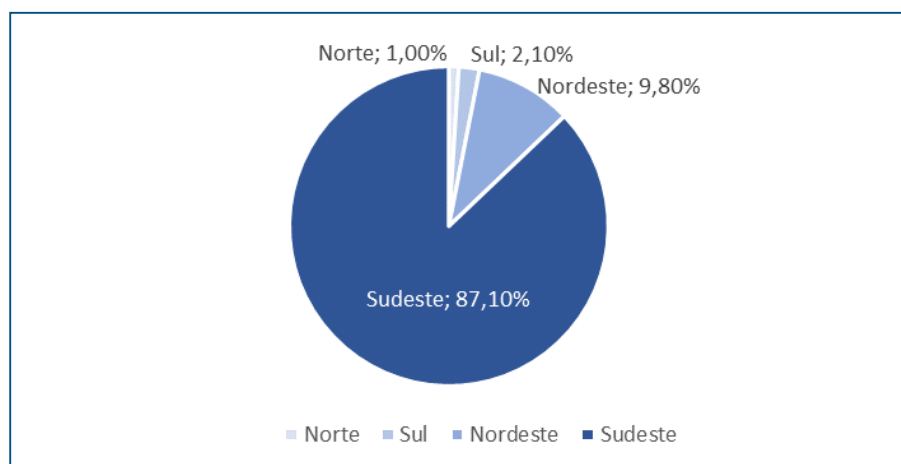


Figura 9 – Distribuição percentual da produção de aço bruto do Brasil, por região geográfica, em 2021 [10].

Tabela 14 – Participação por união federativa na produção de aço bruto do país, em 2021 [10].

Estado	2020	2021	21/20 (%)
Minas Gerais	9.803	10.784	10.0
Rio de Janeiro	9.189	10.283	11.9
Espírito Santo	5.405	7.489	38.6
São Paulo	2.613	2.964	13.4
Ceará	2.855	2.937	2.9
Rio Grande do Sul	668	754	12.9
Pará	330	367	11.2
Maranhão	321	345	7.5
Pernambuco	231	251	8.7
Brasil	31.415	36.174	15.1

4.2.2 Principais empresas do setor

As principais empresas responsáveis pela produção de aço bruto no país são apresentadas na Tabela 15, ranqueadas pelo volume de produção. Destaca-se que as empresas do grupo ArcelorMittal representam 31% da participação entre as empresas ranqueadas, seguida pela Gerdau (19%), Ternium Brasil (13%) e CSN (12%). Juntos esses 4 grupos econômicos contabilizam 74% da produção apresentada.

Tabela 15 – Principais empresas do setor de produção do Aço, em 2021 [10].

Empresa	Produção de Aço Bruto (103 t) ⁵
ArcelorMittal Tubarão	7.089
Gerdau	6.974
Ternium Brasil	4.529
CSN	4.260
ArcelorMittal Aços Longos	3.184
Usiminas	3.178
CSP	2.811
SIMEC	951
ArcelorMittal Sul Fluminense	888
Aperam	754
Vallourec	710
Sinobras	367
Aço Verde do Brasil	345
Villares Metals	134

4.2.3 Processo produtivo

O processo produtivo da fabricação do aço bruto possui quatro etapas principais: preparação da carga, redução, refino; e laminação. Na Figura 10 é ilustrado cada uma dessas partes do processo.

Durante a primeira etapa, a preparação da carga, ocorre a produção de duas matérias primas principais, o sinter e o coque. O sinter é obtido via minério de ferro aglomerado utilizando cal e coque. Já a produção do coque ocorre a partir do processamento do carvão mineral. Em seguida, deseja-se obter o ferro-gusa, liga de ferro e carbono, produzida pela redução do sinter. Tal processo ocorre em um alto-forno, onde o coque do carvão é utilizado para produção do calor, que funde o minério de ferro, gerando metal líquido, conhecido como o ferro-gusa [12].

Há a alternativa de se utilizar o carvão vegetal carbonizado, em vez do coque do carvão mineral. Há também a rota tecnológica, onde emprega-se como matéria prima o ferro-gusa sólido e a sucata de ferro, sem a necessidade da etapa da redução.

A terceira etapa consiste no refino do ferro-gusa, que ocorre nas aciarias, onde o ferro-gusa sólido ou a sucata de ferro é transformada em aço líquido. As aciarias podem ser à oxigênio ou elétricas. Por fim, na última etapa do processo produtivo, a laminação, os semi-acabados de aço são transformados em diversos tipos de produtos siderúrgicos [12].

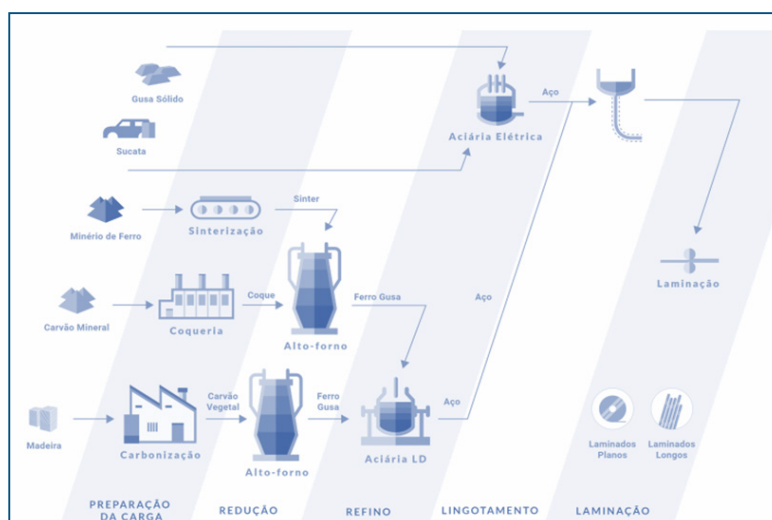


Figura 10 – O processo produtivo da fabricação do aço bruto (Adaptado de [11]).

5 Corresponde à produção de aço em lingotes, produtos de lingotamento contínuo e aço para fundição.

Portanto, há duas rotas tecnológicas principais para produção do aço: usinas integradas e usinas semi-integradas. Na rota tecnológica das usinas integradas, o aço é produzido a partir do ferro-gusa gerado pela etapa de redução do minério de ferro nos altos-fornos, já nas usinas semi-integradas não há a etapa da redução, emprega-se como matéria-prima a sucata de ferro ou o ferro-gusa sólido, e o refino ocorre em aciarias elétricas [13]. As duas rotas tecnológicas são comparadas na Tabela 16.

O segmento siderúrgico Brasileiro é composto por 31 usinas, onde 15 possuem a rota tecnológica integrada e 16 a rota semi-integrada [11]. Em termos de tipo de aciaria, conforme resultados de produção do primeiro trimestre de 2022, 75,2% da produção de aço bruto emprega o processo de aciaria à oxigênio e 24,8% são provenientes de aciaria elétricas [14].

Tabela 16 – Comparação das rotas tecnológicas para produção do aço bruto.

Rota tecnológica	Matéria-Prima	Preparação da carga	Redução	Refino	Laminação
Integradas	Carvão mineral ou vegetal Minério de ferro	Produção de sinter, coque, e carbonização	Produção de ferro gusa	Refino do aço	Produtos siderúrgicos
Semi-integradas	Ferro gusa sólido Sucata de Ferro	Não há	Não há	Refino do aço (aciaria elétrica)	Produtos siderúrgicos

4.2.4 Uso da energia elétrica

4.2.4.1 Aspectos gerais

Conforme apresentado na Tabela 17, o segmento industrial da metalurgia foi o maior consumidor de energia elétrica do país em 2021, com 24,4% de participação equivalente a 43.613 GWh. Neste setor estão contempladas as usinas siderúrgicas produtoras de aço bruto.

O consumo de eletricidade representou, em 2020, 4,9% da matriz energética das indústrias produtoras de aço bruto. O carvão mineral, utilizado na etapa de redução do minério de ferro para produção do ferro-gusa, foi responsável por 70,3% do consumo de energia, seguido pela utilização de insumos energéticos derivados do petróleo, com 16%, e por fim o uso do carvão vegetal, também na etapa de redução, com 4,9%. A matriz energética das indústrias siderúrgicas é apresentada na Tabela 18.

Tabela 17 – Consumo de energia elétrica no setor de metalurgia no Brasil, em 2021 [15].

Setor Industrial	Consumo (GWh)	Part. %
Metalurgia	43.613	24,4

Tabela 18 – Consumo de energia por fonte na produção de aço [11].

Matriz energética (%)	2018	2019	2020
Carvão mineral / Coque	75,6%	71,0%	70,3%
Derivados de petróleo	14,2%	15,4%	16,0%
Carvão vegetal	5,9%	8,8%	8,8%
Energia elétrica	4,2%	4,8%	4,9%

Contudo, conforme discutido no primeiro tópico desta seção, o Brasil possui grande relevância mundial na produção de aço bruto e, mesmo que nesse setor a participação da eletricidade na matriz energética seja baixa devido ao grande volume de produção, entende-se que ambas as rotas tecnológicas possuem consumo de eletricidade com grande relevância no consumo do setor metalúrgico e do setor industrial como um todo. A análise qualitativa da relevância é apresentada na Tabela 19.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 19 foi realizada a partir da estimativa quantitativa do consumo de eletricidade por rota tecnológica em relação ao consumo de eletricidade do setor metalúrgico e do setor industrial como um todo. Para o primeiro caso, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 8%, médio entre 8% e 20% e alto maior ou igual que 20%. No segundo caso, baixo equivale a participação menor que 2%, médio entre 2% e 6% e alto maior ou igual a 6%.

Destaca-se ainda que, em 2020, as siderúrgicas obtiveram 51% da eletricidade consumida a partir da geração própria.

Essa autogeração ocorre por meio de centrais termelétricas existentes na própria planta industrial, que utiliza os gases dos processos de produção do coque, alto-forno e aciaria, para gerar vapor por meio de turbinas de eletricidade. A geração própria também tem origem em usinas hidrelétricas adquiridas pelas siderúrgicas. A relação entre os tipos de origem da energia elétrica consumida para produção do aço bruto é apresentada na Tabela 20.

Visando o uso mais eficiente da energia, as indústrias siderúrgicas têm buscado aplicar as seguintes iniciativas: (i) cogeração de energia elétrica através do reaproveitamento dos gases do processo; (ii) substituição de insumos e combustíveis; (iii) otimização do controle dos processos via automação; e (iv) programas de treinamento e sensibilização de fornecedores [16].

As siderurgias apresentam grande intensidade energética, onde o consumo específico de energia é afetado por diversas questões, atreladas principalmente às rotas tecnológicas e aos processos utilizados, à qualidade dos materiais e insumos energéticos, além das características do produto que se deseja obter [7].

Tabela 19 – Avaliação da relevância da produção de aço bruto (Elaboração própria com dados de [7], [10], [11] e [15]).

Subsegmento ou rota tecnológica	Relevância em relação ao consumo do setor da metalurgia (%)
Plantas integradas	Alto
Plantas semi-integradas	Alto
Relevância do consumo do segmento de produção de aço bruto em relação ao setor industrial	Alto

Tabela 20 – Consumo de energia por fonte na produção de aço [11].

Origem da energia elétrica (%)	2018	2019	2020
Geração própria	56%	51%	51%
Comprada	44%	49%	49%

4.2.4.2 Uso da energia elétrica no processo produtivo

Conforme apresentado no tópico anterior, a produção de aço bruto possui duas rotas tecnológicas principais, a integrada e a semi-integrada, sendo que dentro da rota integrada existem processos que utilizam o carvão mineral para produção de coque, e processos em que é utilizado o carvão vegetal e não há a produção de coque. Portanto, há três tipos de processos principais para produção do aço bruto:

- Usinas integradas, com produção de coque (carvão mineral);
- Usinas integradas, sem a produção de coque (carvão vegetal);
- Usinas semi-integradas.

As usinas integradas, por possuírem os altos-fornos, equipamentos que demandam grande quantidade de energia térmica para produção do ferro-gusa, são caracterizadas como indústrias mais energo-intensivas, entretanto, são menos eletrointensivas uma vez que a utilização da eletricidade está associada ao acionamento dos motores elétricos para produção da força motriz.

Já as usinas semi-integradas são menos energo-intensivas do que as rotas tecnológicas alternativas, contudo, são mais eletro-intensivas, pois além da necessidade de eletricidade para produção da força motriz, também há grande demanda de energia elétrica para o aquecimento direto.

Na Tabela 21 são apresentados os valores de consumo específico médio para as três rotas tecnológicas destacadas. Nota-se que para as plantas com a rotas tecnológicas integradas o consumo específico é de 18,614 e 18,076 GJ para produção de 1 tonelada de aço bruto. Já para plantas com a rota tecnológica semi-integrada o consumo específico é de 9,755 GJ/t. Verifica-se que as plantas semi-integradas possuem maior valor absoluto de consumo específico de eletricidade, com 7,71 GJ/t, além de ser a rota onde a eletricidade possui maior participação se comparado com outros energéticos, com 79,02%. Nas plantas semi-integradas, as aciarias são a etapa do processo produtivo onde há o maior consumo específico de energia com 5,27 GJ/t.

Tabela 21 – Consumo de energia específico médio na produção de aço bruto para diferentes rotas tecnológicas (Adaptado de [7]).

Subsegmento ou Rota Tecnológica	Consumo Específico de Energia Total (GJ/t)	Consumo Específico de Energia Elétrica (GJ/t)
Plantas integradas, com produção de coque	18,614	2,139
Plantas integradas, sem a produção de coque	18,076	4,938
Plantas semi-integradas	9,755	7,708
Total	46,445	14,785

Considerando que cada uma das rotas tecnológicas possui etapas dos processos produtivos distintos, realizou-se na Tabela 22 uma análise qualitativa do nível de consumo de eletricidade por etapa do processo produtivo, para produção de aço bruto, para cada uma das rotas.

Verifica-se que os processos de aciaria e laminação se destacam como os principais consumidores de eletricidade na indústria do aço. Nas plantas com rota integrada a laminação se destaca como o principal processo consumidor de energia elétrica. Já para as plantas semi-integradas o grande destaque em termos de consumo de eletricidade são as aciarias.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 22 foi realizada a partir da estimativa quantitativa da distribuição percentual do consumo específico de eletricidade por etapa do processo produtivo para cada rota tecnológica. Nesse sentido, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 10%, médio entre 10% e 40% e alto maior ou igual que 40%.

A Tabela 23 apresenta a relação de equipamentos mais relevantes no consumo de energia elétrica por rota tecnológica. Observa-se que, para as rotas integradas, os equipamentos destacados são ventiladores, separadores, bombas, shredders, compressores e laminadores. As usinas semi-integradas contabilizam muitos dos mesmos equipamentos listados da outra rota, porém há o adicional dos fornos elétricos, componentes das aciarias.

Tabela 22 – Relevância do consumo de eletricidade para produção de aço bruto para diferentes rotas tecnológicas por etapa do processo produtivo (Elaboração própria com dados de [7]).

Subsegmento ou rota tecnológica	Plantas integradas, com produção de coque	Plantas integradas, sem a produção de coque	Plantas semi-integradas
Pelotização	Não se aplica	Baixo	Não se aplica
Sinterização	Médio	Não se aplica	Não se aplica
Alto-Forno	Médio	Médio	Não se aplica
Aciaria	Baixo	Médio	Alto
Laminação	Alto	Alto	Médio
Outros	Não se aplica	Não se aplica	Médio

Tabela 23 – Principais equipamentos consumidores de energia elétrica na produção de aço bruto para diferentes rotas tecnológicas (Elaboração própria com dados de [7]).

Equipamento	Plantas integradas, com produção de coque	Plantas integradas, sem a produção de coque	Plantas semi-integradas
Grandes ventiladores	X	X	X
Sopradores das ventaneiras e regeneradores (alto-forno)	X	X	
Sistemas de geração de energia (cogeração)	X	X	
Shredder	X	X	X
Correias transportadoras	X	X	X
Laminadores	X	X	X
Sistemas de tratamento e bombeamento de água	X	X	X
Sistemas de despoeiramento (primário e secundário)	X	X	
Bombas de caldeira	X	X	
Gaseificação e compressores	X	X	X
Forno Elétrico a arco			X
Forno Panela			X

A Tabela 24 apresenta uma análise qualitativa quanto ao uso final da energia elétrica. Observa-se que a força motriz é altamente empregada nas usinas integradas, vale ressaltar que, nestes casos, a etapa do processo que mais consome eletricidade é a laminação.

Já para as plantas semi-integradas, sabe-se que a etapa da aciaria possui fornos elétricos e estes são os maiores consumidores de energia elétrica, logo, o uso final do tipo aquecimento direto é o mais representativo, seguido da força motriz.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 24 foi realizada a partir da estimativa quantitativa da distribuição percentual do consumo específico de eletricidade por tipo de uso final de energia elétrica para cada rota tecnológica. Nesse sentido, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 10%, médio entre 10% e 50% e alto maior ou igual que 50%.

Tabela 24 – Avaliação de destinação da energia elétrica por uso final, para diferentes as rotas tecnológicas (Adaptado de [7]).

Tipo de uso final	Plantas integradas, com produção de coque	Plantas integradas, sem a produção de coque	Plantas semi-integradas
Força motriz	Alto	Alto	Médio
Aquecimento direto	Não se aplica	Não se aplica	Alto
Iluminação	Baixo	Baixo	Baixo

4.3 Indústria do alumínio

4.3.1 Visão geral

O alumínio primário é produzido a partir da mineração da bauxita, sendo esse o terceiro elemento de maior abundância na crosta da terra, onde o Brasil possui a quarta maior reserva do mundo. A partir da dissolução da bauxita em solução de soda caustica e cal aquecida obtém-se um pó branco conhecido como alumina (óxido de alumínio). Por fim, a partir da alumina em altas temperaturas é produzido o alumínio primário que, por sua vez, é utilizado para a produção de produtos transformados do alumínio como placas, tubos, vergalhões e itens diversos para uso final, como os destinados à construção civil. Também é possível produzir alumínio através da reciclagem, em que o Brasil possui um dos maiores índices de reciclagem de latas de alumínio, passando dos 97% [17].

Atualmente o potencial de produção é restrito essencialmente à duas fábricas: da Albras em Bacarena (PA) e da CBA no município de Alumínio (SP). A Figura 11 apresenta um resumo da cadeia produtiva do alumínio [18].

As Tabelas 25 e 27 mostram que a produção de alumínio primário no Brasil cresceu 5,4% em 2020, com 685 mil toneladas produzidas. Esse é o melhor resultado desde o ano de 2018, entretanto, o auge de produção ocorreu em 2008, quando o país contava com sete plantas de fabricação num total de 1661 mil toneladas [18].

A Tabela 27 apresenta o ranking dos maiores produtores mundiais de alumínio. No ano de 2020, o Brasil encontra-se na 15ª posição na produção de alumínio primário, o que equivale a 1,2% da produção mundial [18].

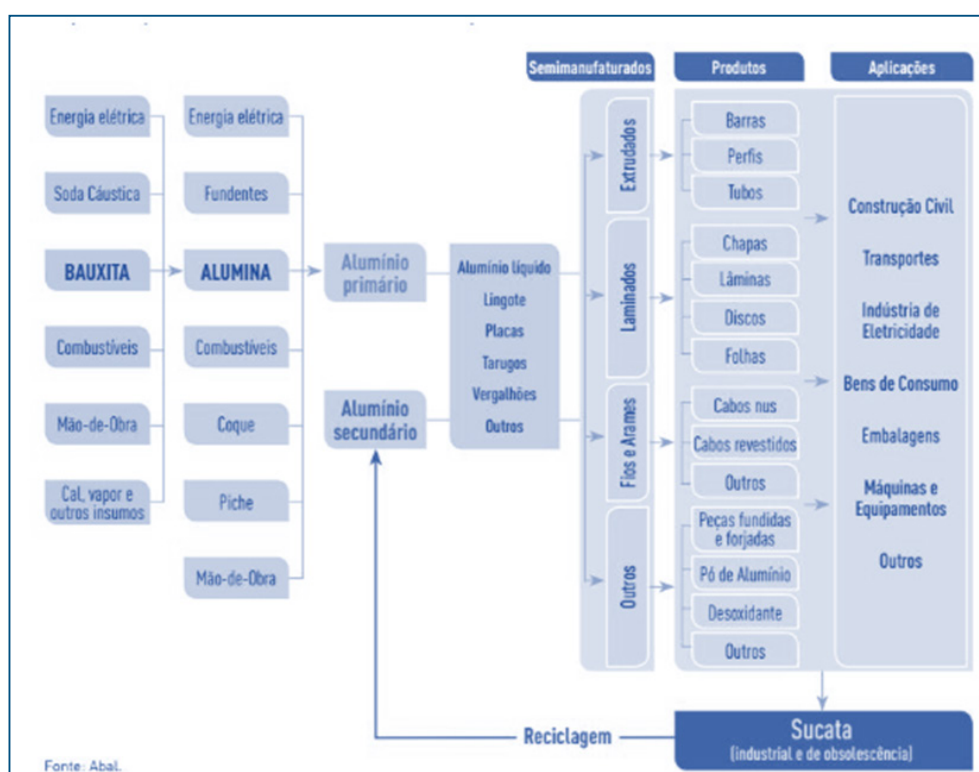


Figura 11 – Visão geral da cadeia produtiva de alumínio (Adaptado de [19]).

Tabela 25 – Perfil da indústria do alumínio [20].

Composição	2019	2020
Empregos (31/dez)	588,080	423,762
Diretos	114,015	113,610
Indiretos	474,065	310,151
Faturamento (US\$ bilhões)	21.3	17.1
Participação no PIB	-	-
Participação no PIB Industrial	-	-
Investimento bruto (US\$ milhões)	0.3	0.2
Impostos pagos (US\$ bilhões)	4.6	3.7
Produção de alumínio primário (mil toneladas)	650	685
Consumo doméstico de produtos transformados (mil toneladas)	1,486	1,424
Consumo per capita (Kg/habitante)	7.1	6.7
Exportação (mil toneladas)(peso alumínio)	287	333
Importação (mil toneladas)(peso alumínio)	784	688
Balança comercial da indústria do alumínio (US\$ milhões FOB)		
Exportações	3,732	3,439
Importações	1,977	1,689
Saldo	1,755	1,750
Participação das exportações de alumínio nas exportações brasileiras	0	0

Tabela 26 – Faturamento e investimentos em Real [20].

Composição	2019	2020
Faturamento (R\$ bilhões)	84.2	88.3
Participação no PIB	1.1%	1.2%
Participação no PIB Industrial	6.2%	6.7%
Investimento bruto (R\$ milhões)	1.0	1.2
Impostos pagos (R\$ bilhões)	18.1	19.0

Tabela 27 – Ranking mundial de produção de alumínio primário [20].

Ranking	Alumínio Primário	Volume
1º	China	37,080
2º	Rússia	3,856
3º	Índia	3,554
4º	Canadá	3,113
5º	Emirados Árabes	2,505
6º	Austrália	1,582
7º	Bahrein	1,549
8º	Vietnã	1,395
9º	Noruega	1,302
10º	Estados Unidos	1,027
11º	Arábia Saudita	1,011
12º	Malásia	751
13º	Islândia	728
14º	África do Sul	717
15º	Brasil	685
Outros		5,731
Total		66,586

A Tabela 28 apresenta a produção de transformados de alumínio no Brasil. Destacam-se a produção de chapas, extrudados, fundidos e de cabos, compondo 87,2% da produção total de transformados de alumínio em 2020.

Tabela 28 – Histórico da produção dos tipos de transformados de alumínio em mil toneladas [20].

Tipos de produtos	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Chapas	507.8	506.8	542.9	585.9	592.0	580.2	604.0	637.1	692.1
Folhas	92.5	87.0	87.2	85.2	78.0	81.6	86.8	84.0	74.1
Extrudados	326.1	332.1	357.8	318.7	270.5	218.2	226.9	230.0	224.0
Cabos	149.4	134.9	138.9	131.6	109.6	134.5	122.2	124.5	169.1
Fundidos	246.4	232.4	223.9	165.2	138.0	120.3	145.8	163.5	166.5
Pó	42.6	39.9	33.8	28.4	22.8	17.4	24.3	25.5	29.8
Usos destrutivos	41.9	41.4	40.8	40.4	39.6	36.0	41.0	41.4	38.4
Outros	22.2	23.8	25.6	26.2	22.5	23.9	27.3	35.4	28.3
Total	1.428,9	1.398,3	1.450,9	1.381,6	1.273,0	1.212,1	1.278,3	1.341,4	1.422,3

A Figura 12 apresenta a relação da sucata de alumínio recuperada para produção de alumínio secundário e o consumo doméstico no ano de 2019 no mundo. O Reino Unido é o maior destaque com 64,5% de materiais reciclados e o Brasil encontra-se na 2ª posição com 53,9% de materiais reciclados. Nota-se que o Brasil está consideravelmente acima da média mundial de 28,5%.

A maioria dos estados possuem plantas de operação em funcionamento, apenas nos estados do Rio Grande do Norte, Alagoas, Sergipe, Amapá, Roraima, Acre, Rondônia, Mato Grosso e Tocantins não há qualquer produção de alumínio primário ou de transformados de alumínio.

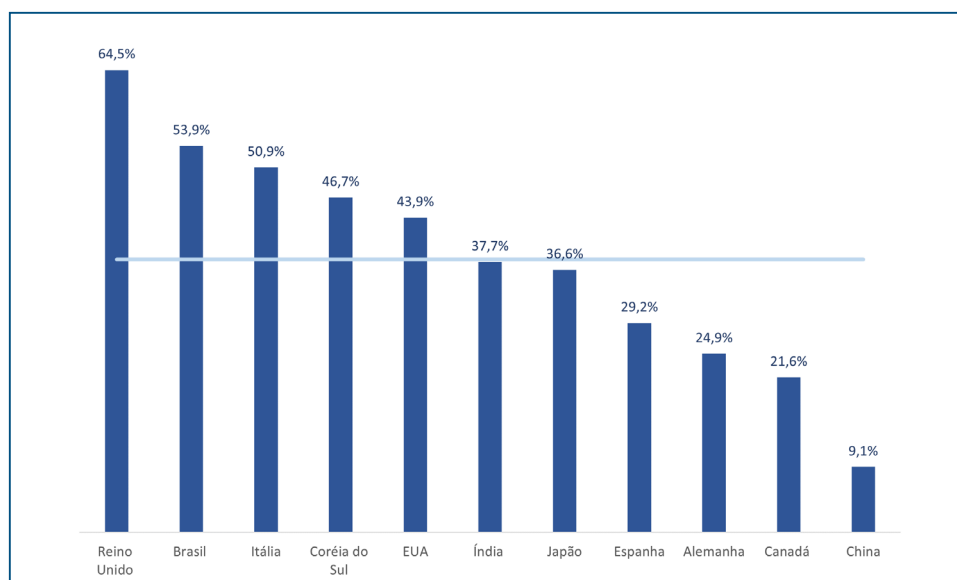


Figura 12 – A relação da sucata de alumínio recuperada e o consumo doméstico no ano de 2019 no mundo [21].

4.3.2 Principais empresas do setor

Apesar do aumento de produção de alumínio primário entre os anos de 2019 e 2020, houve queda na produção total a partir de 2011 conforme a Tabela 29. Houve redução no número de plantas que produziam alumínio primário no país, saindo de 7 em 2008 para apenas 2 a partir de 2016, sendo elas as plantas de CBA no município de Alumínio (SP) e da Albras em Bacarena (PA).

A Tabela 30 apresenta empresas relevantes do segmento de alumínio no Brasil incluindo as empresas que produzem produtos transformados de alumínio.

Tabela 29 – Principais empresas do setor de produção do Alumínio primário, em 2021 [20].

Produtores	Localização	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Albras	Bacarena (PA)	458.1	446.7	452.3	441.0	435.2	446.1	446.7	307.5	326.6	378.9
Alcoa	Poços de Caldas (MG)	87.9	85.9	69.4	17.5	-	-	-	-	-	-
Alumar	São Luís (MA)	438.3	402.4	339.5	167.0	34.8	-	-	-	-	-
CBA	Alumínio (SP)	409.0	454.9	413.7	318.5	302.2	343.9	355.0	351.5	323.6	306.2
Novelis	Ouro Preto (MG)	47.1	46.5	29.2	18.0	-	-	-	-	-	-
Total		1.440,4	1.436,4	1.304,1	962,0	772,2	790,0	801,7	659,0	650,2	685,1

Tabela 30 – Principais empresas do setor de produção do Alumínio, em 2021 [18].

Empresa	Segmento
Albras	Produção de alumínio primário
Alcoa World Alumina	Transformados de Alumínio
Companhia Brasileira de Alumínio (CBA)	Produção de alumínio primário
Hydro Extrusion Brasil	Transformados de Alumínio
Hydro Paragominas	Transformados de Alumínio
Novelis	Transformados de Alumínio
South 32 Materials	Bauxita, Alumina e Alumínio Primário
Termomecanica	Transformados de Alumínio
Alcast	Transformados de Alumínio
Ibrame	Transformados de Alumínio
AMG Brasil	Transformados de Alumínio

4.3.3 Processo produtivo

O processo de produção do alumínio primário possui como etapa inicial a separação do oxigênio existente na alumina, através do processo de eletrólise, que ocorre nas cubas eletrolíticas. O processo que ocorre nas cubas eletrolíticas resume-se a aplicar uma grande quantidade de corrente elétrica entre um ânodo e um catodo, a reação eletroquímica implica na combinação do oxigênio com o ânodo e na precipitação do alumínio metálico líquido no fundo da cuba eletrolítica. A partir do alumínio líquido são produzidos os lingotes, placas e tarugos utilizados pela indústria de transformação [21].

Após a produção do alumínio primário, a etapa seguinte da cadeia produtiva consiste na transformação desse material bruto em produtos semiacabados e produtos. A Tabela 31 apresenta um resumo dos principais processos empregados na indústria de transformação do alumínio e a respectiva descrição.

Tabela 31 – Principais processos produtivos na indústria de transformados de alumínio (Elaboração própria com dados de [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29] e [30]).

Processo	Descrição
Fundição	Processamento do alumínio metálico em alta temperatura, ocorre a fusão do metal, que na forma líquida é escoado para um molde.
Forjamento	Processo de conformação do bloco, tarugo ou perfil de alumínio, pelo qual se obtém a forma desejada por martelamento ou aplicação gradativa de uma pressão. A maioria das operações de forjamento é feitas a quente.
Extrusão	É um processo no qual o tarugo de alumínio é reduzido em sua seção transversal quando forçado a fluir através do orifício de uma matriz, sob o efeito de altas pressões e temperatura.
Laminação	Processo que se inicia com o aquecimento do bloco de alumínio, o qual é achatado por rolos de deslizamento, ocorre a redução da espessura e aumento do comprimento do bloco, ou seja, transformado em uma chapa.
Usinagem	Corte da peça de alumínio visando obter geometrias detalhadas. Geralmente emprega-se os tornos mecânicos.
Soldagem	A soldagem consiste na fusão conjunta das bordas a serem unidas, frequentemente pela adição de metal líquido para preencher um canal com a forma de V.
Estampagem	Neste processo o material de alumínio é pressionado por uma punção contra uma matriz. Estas operações requerem material com grande plasticidade, alta ductilidade e com uma baixa taxa de encruamento. Exemplo: produção de utensílios domésticos e latas de bebidas.
Acabamentos	Acabamentos especiais visando proteção e decoração do produto de alumínio. Exemplo: pintura.

4.3.4 Uso da energia elétrica

4.3.4.1 Aspectos gerais

Conforme apresentado na Tabela 32, o segmento industrial da metalurgia foi o maior consumidor de energia elétrica do país em 2021, com 24,4% de participação equivalentes a 43.613 GWh. Neste setor estão contempladas as usinas siderúrgicas produtoras de alumínio primário. Já as indústrias de transformados de alumínio se enquadram no setor de Fabricação de Produtos de Metais, que consumiu, em 2021, 4.302 GWh com a participação de 2,4% no consumo total do país.

A Figura 13 apresenta a matriz energética da cadeia produtiva do alumínio, a partir da produção do alumínio primário. Nota-se que a fabricação do alumínio bruto é a etapa da cadeia em que a eletricidade tem a maior participação na matriz, com 66,6%. A indústria de transformados aparece na segunda colocação nesse quesito, com 56%. Já na produção secundária de alumínio, a partir da reciclagem, o consumo de energia elétrica corresponde a apenas 11%, sendo o gás natural o energético mais importante da matriz.

Tabela 32 – Consumo de energia elétrica no setor de metalurgia e fabricação de produtos de metal no Brasil, em 2021 [29].

Sector Industrial	Consumo (GWh)	Part. %
Metalurgia	43.613	24,4
Fabricação de Produtos de Metal, Exceto Máquinas e Equipamentos	4.302	2,4

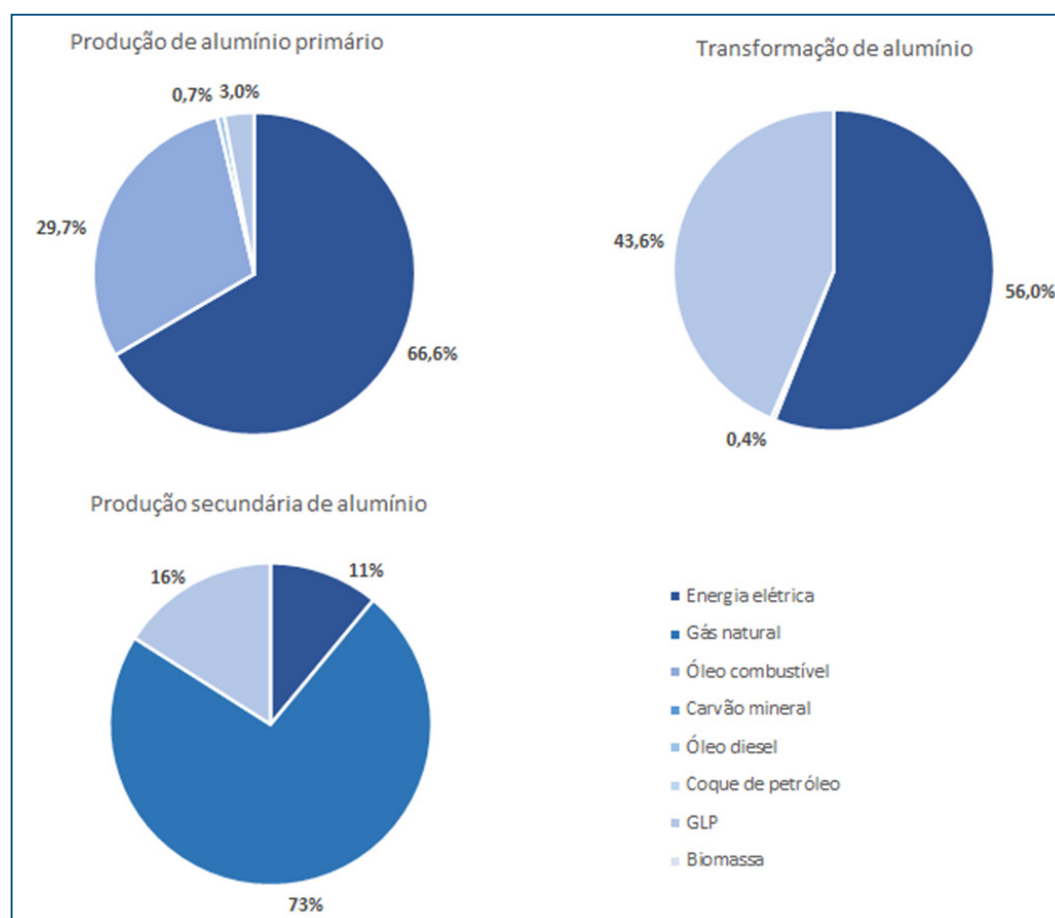


Figura 13 – Matriz energética da cadeia produtiva do alumínio [31].

A Tabela 33 apresenta a análise qualitativa da relevância do consumo de eletricidade dos subsegmentos da cadeia produtiva do alumínio em relação aos setores de metalurgia, fabricação de produtos de metal e ao setor elétrico como um todo. Nota-se que o resultado corrobora com o visto nos gráficos das matrizes energéticas de cada subsegmento, ou seja, os subsegmentos de produção de alumínio primário e transformação do alumínio se destacam, e impulsionam a relevância do setor de alumínio na consumo de eletricidade do país. Em contrapartida, o setor de produção de alumínio secundário tem baixa relevância e não será objeto de estudo desse relatório.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 33 foi realizada a partir da estimativa quantitativa do consumo de eletricidade subsegmento em relação ao consumo de eletricidade do setor de alumínio e do setor industrial como um todo. Para o primeiro caso, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 8%, médio entre 8% e 20% e alto maior ou igual que 20%. No segundo caso, baixo equivale a participação menor que 2%, médio entre 2% e 6% e alto maior ou igual a 6%.

Tabela 33 – Análise qualitativa da relevância do consumo de eletricidade dos subsegmentos da cadeia produtiva do alumínio (Elaboração própria com dados de [31]).

Subsegmento ou rota tecnológica	Relevância em relação ao consumo do setor industrial (%)
Produção de alumínio primário	Alto
Transformação do alumínio	Alto
Produção de alumínio secundário	Baixo
Relevância do consumo do segmento do Alumínio em relação ao setor industrial como um todo	Alto

4.3.4.2 Uso da energia elétrica no processo produtivo

Conforme apresentado na Tabela 34, dois subsegmentos da cadeia do alumínio se destacam como consumidores de eletricidade, a etapa de produção do alumínio primária e a etapa de transformação do alumínio bruto em produtos semi-acabados e produtos finais. Logo, estas duas etapas serão objeto de análise desse tópico.

Na Tabela 34 é apresentada uma análise que ordena cada um dos subsegmentos da indústria do alumínio em função do consumo de energia como um todo e somente no âmbito do consumo de eletricidade.

A produção de alumínio primário possui sua alta intensidade de consumo de energia elétrica atrelada ao processo de eletrólise da alumina, já as indústrias de transformados consomem eletricidade principalmente para obter a força motriz proveniente de motores elétricos.

Considerando-se que cada etapa da cadeia produtiva do alumínio destacadas nesta análise possuem etapas dos processos produtivos distintos, realizou-se na Tabela 35 uma análise qualitativa do nível de consumo de eletricidade por etapa do processo produtivo, para produção de aço bruto, para cada uma das rotas.

Tabela 34 – Classificação das etapas da indústria do alumínio (Elaboração própria com dados de [31]).

Subsegmento ou Rota Tecnológica	Consumo Específico de Energia Total (GJ/t)	Consumo Específico de Energia Elétrica (GJ/t)
Produção de alumínio primário	80,85	53,8461
Transformação de Alumínio	4,00	2,24
Produção de Alumínio secundário	5,50	0,605
Total	90,35	56,6911

Tabela 35 – Relevância do consumo de eletricidade para os subsegmentos do alumínio (Elaboração própria com dados de [20] e [31]).

Subsegmento ou rota tecnológica	Produção de alumínio primário	Transformação do Alumínio
Serviços Auxiliares	Baixo	Baixo
Iluminação	Baixo	Baixo
Eletrólise da alumina	Alto	Não se aplica
Extrusão	Não se aplica	Médio
Laminação	Não se aplica	Alto
Usinagem	Não se aplica	Baixo
Soldagem	Não se aplica	Baixo
Estampagem	Não se aplica	Baixo

Verifica-se que o processo de eletrólise da alumina se destaca como o principal consumidor de eletricidade na indústria de produção do alumínio primário. Já para a indústria de transformados de alumínio o grande destaque no quesito consumo de eletricidade seria o processo de laminação e, posteriormente, os processos de extrusão, usinagem, soldagem e estampagem. Além de serviços auxiliares.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 36 foi realizada a partir da estimativa quantitativa da distribuição percentual do consumo específico de eletricidade por etapa do processo produtivo para cada subsegmento. Nesse sentido, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 10%, médio entre 10% e 40% e alto maior ou igual que 40%.

A Tabela 36 apresenta a relação de equipamentos mais relevantes no consumo de energia elétrica por subsegmento. Observa-se que, para a indústria de produção do alumínio primário, o principal consumidor de eletricidade é a cuba eletrolítica. As indústrias de transformação do alumínio possuem como os principais consumidores de eletricidade as máquinas utilizadas para conformação do metal.

Por fim, a Tabela 37 apresenta uma análise qualitativa quanto ao uso final da energia elétrica. Observa-se que a força motriz é altamente empregada nas usinas de transformação, vale ressaltar que, nestes casos, a etapa do processo que mais consomem eletricidade são os relacionados a conformação do alumínio, com destaque para laminação. Já para as plantas de produção do alumínio primário, sabe-se que a etapa da eletrólise da alumina é a maior consumidora de energia elétrica, logo, o uso final do tipo eletroquímico é mais relevante.

Tabela 36 – Principais equipamentos consumidores de energia elétrica na produção de alumínio, para diferentes rotas tecnológicas (Elaboração própria com dados de [20] e [31]).

Equipamento	Produção de alumínio primário	Transformação do alumínio
Equipamentos para serviços auxiliares	X	X
Cuba eletrolítica (Forno)	X	
Máquina extrusora		X
Máquina laminadora		X
Tornos mecânicos		X
Máquinas de solda		X
Máquina de Estampagem		X

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 37 foi realizada a partir da estimativa quantitativa da distribuição percentual do consumo específico de eletricidade por tipo de uso final de energia elétrica para cada rota tecnológica. Nesse sentido, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 10%, médio entre 10% e 50% e alto maior ou igual que 50%.

Tabela 37 – Avaliação de destinação da energia elétrica por uso final, para diferentes as rotas tecnológicas (Elaboração própria com dados de [20] e [31]).

Tipo de uso final	Produção de alumínio primário	Transformação do alumínio
Força motriz	Baixo	Alto
Aquecimento direto	Não se aplica	Não se aplica
Iluminação	Baixo	Baixo
Eletroquímica	Alto	Não se aplica
Refrigeração	Não se aplica	Não se aplica

4.4 Indústria do cimento

4.4.1 Visão geral

O cimento é o principal componente do concreto, material diretamente ligado à construção civil, de estradas, pontes, habitações, escolas, hospitais, sistemas de tratamento de água e esgoto e diversos tipos de estruturas. O seu processo produtivo inclui o aproveitamento de resíduos sólidos industriais e urbanos, o que contribui para a solução de certos problemas ambientais.

Em resumo, a produção do cimento se dá pela combinação de exploração e beneficiamento de substâncias minerais não metálicas. Essas substâncias são transformadas quimicamente em um produto intermediário do cimento chamado clínquer em forno a cerca de 1450 °C.

Posteriormente acontece a moagem, onde há mistura com outros materiais de acordo com o tipo de cimento a ser produzido [32]. A Figura 14 apresenta um resumo da cadeia produtiva do cimento.

A Figura 15 mostra os principais produtores de cimento no mundo em mil toneladas (kt), onde a China se destaca como o maior produtor com 2,2 milhões. O Brasil encontra-se na 9ª posição com 61,15 mil toneladas.

A Figura 16 apresenta a produção de cimento no Brasil por região em 2020. Sendo o Sudeste a principal região produtora com 28,49 milhões de toneladas. Seguida pelo Nordeste com 12,87 milhões de toneladas e pelo Sul 10,11 milhões de toneladas.

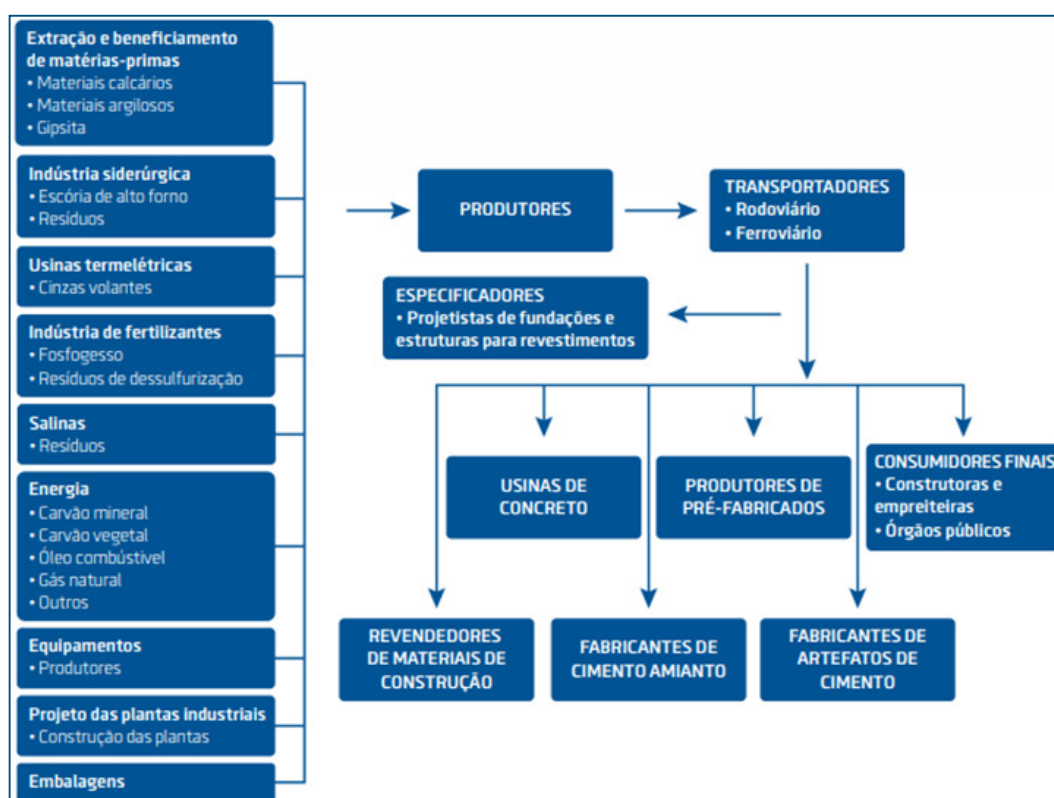


Figura 14 – Cadeia produtiva do setor do cimento [32].

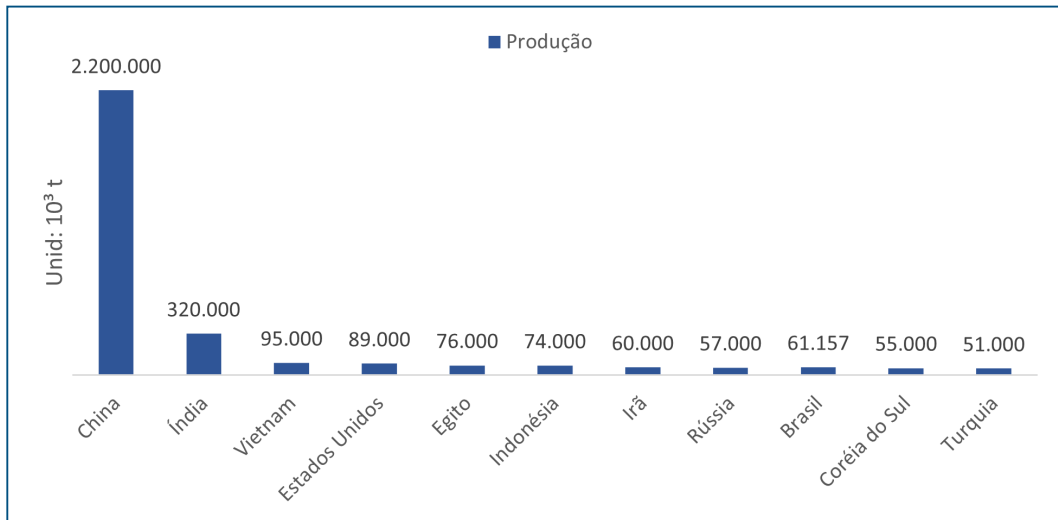


Figura 15 – Ranking da produção mundial de cimento (Adaptado de [33]).

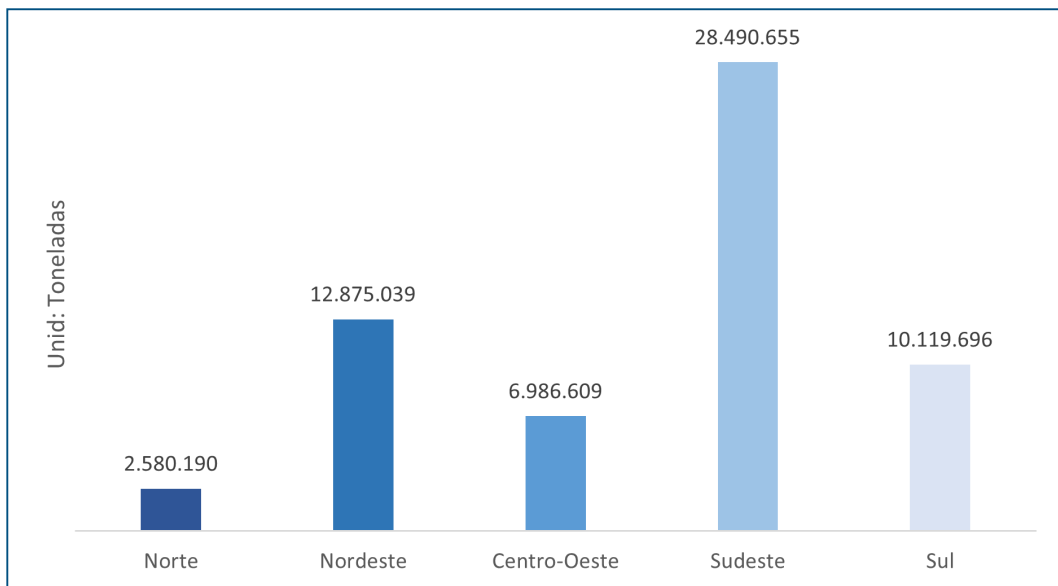


Figura 16 – Distribuição regional da produção de cimento no Brasil (Adaptado de [33]).

4.4.2 Principais empresas do setor

O Brasil possui, atualmente, 24 grupos cimenteiros com 34 marcas ao todo distribuídos em 24 estados do país. Conforme Tabela 38 abaixo, o maior grupo é o Votorantim, que possui 28 plantas cimenteiras em 16 estados com capacidade de produção de 34,86 milhões de toneladas por ano. Em seguida, os maiores produtores são os grupos Interceiment, com 16 plantas em 9 estados e 15,99 milhões

de toneladas por ano de capacidade de produção, o grupo Nassau com 11 plantas em 10 estados com 8,4 milhões de toneladas por ano de capacidade de produção e o grupo LafargeHolcim com 10 plantas em 7 estados e 12,54 milhões de toneladas por ano de capacidade de produção. Esses 4 grupos compõem 69,8% da produção total de cimento do país em 2017.

Tabela 38 – Informações sobre os principais grupos cimenteiros do país [34].

Grupos	Marcas que Produzem	Número de Plantas	Capacidade Instalada (t/ano)	UF com Plantas
VOTORANTIM	VOTORAN, POTY, ITAU, TOCANTINS	28	34.866.000	CE-DF-GO-MA-MG-MS-MT-PA-PE-PR-RJ-RO-RS-SE-SP-TO
INTERCEMENT	CAUÊ, CIMPOR, ZEBU e GÓIAS	16	15.990.000	AL-BA-GO-MG-MS-PB-PE-RS-SP
NASSAU	NASSAU E ITA	11	8.400.000	AM-BA-CE-ES-MA-PA-PE-PI-RN-SE
LafargeHolcim	LAFARGE, MONTES CLAROS, MAUÁ E HOLCIM	10	12.540.000	BA-MG-GO-PB-RJ-ES-SP
MIZU	MIZU	7	5.239.800	AM-ES-RJ-RN-SE-SP-MG
CSN	CSN	2	2.760.000	MG e RJ
TUPI	TUPI	3	3.840.000	MG-RJ-SP
Ciplan	Ciplan	1	2.760.000	DF
Cimento ITAMBÉ	ITAMBÉ	1	2.700.000	PR
CRH	CAMPEÃO e ALVORADA	4	2.640.000	MG-RJ
Ricardo Brenand	Nacional	2	2.460.000	MG e PB
LIZ	LIZ	1	1.980.000	MG
SECIL	SUPREMO	2	1.500.000	PR E SC
Ivens Dias Branco	Apodi	2	1.440.000	CE
ELIZABETH	Elizabeth	1	960.000	PB
Grupo ASA	FORTE	1	600.000	PE
Queiroz Galvão e Cornélio Brennand	Bravo	1	480.000	MA
CVB (Masaveu e Ferroeste)	Açai	1	360.000	MA
Mineradora Camocal	Uau	1	240.000	MG
Grupo Petribú	PAJEÚ	1	180.000	PE
Pozosul	POZOSUL	1	96.000	SC
ICIBRA	LAFARGE	1	60.000	MA
Cimento Zumbi	Cimento Zumbi	1	480.000	AL
Cimento Elo	Elo	1	210.000	RN
24 Grupos cimenteiros	34 MARCAS	100	102.781.800	Em 24 UFs

4.4.3 Processo produtivo

A produção de cimento consiste na atividade integrada de exploração e refino dos minerais não metálicos calcário e argila, no processo de transformação deles em clínquer, e na etapa de moagem responsável por transformar o clínquer em cimento [35].

A Figura 17 apresenta o resumo do processo produtivo de fabricação do cimento. As etapas 1 e 2 compõem o processo de extração e preparo da matéria prima. Entre as etapas 3 e 6 ocorre a transformação da matéria prima na denominada farinha, através de inserção de produtos químicos e ações de aquecimento e calcinação. Na etapa 7 ocorre a produção do clínquer, por meio do aquecimento da farinha pré-calcinada em fornos rotativos onde o calor intenso provoca reações químicas e físicas que fundem parcialmente a farinha, transformando-a em clínquer. Por fim, entre as etapas 8 e 10 há a produção do cimento em si, nessas fases o clínquer é resfriado e posteriormente moído com a adição de gesso na mistura, assim ocorre a transformação em pó cinza, o cimento [36].

Vale ressaltar que, nas plantas integradas, a produção do clínquer e do cimento em si ocorrem no mesmo local, já nas plantas de moagens há somente a produção do cimento e o clínquer é adquirido das usinas integradas [36].

4.4.4 Uso da energia elétrica

4.4.4.1 Aspectos gerais

Conforme apresentado na Tabela 39, o segmento industrial da fabricação de produtos de minerais não-metálicos é o 4º maior consumidor de eletricidade do país, representando 8,1% do consumo total da nação, equivalente a 14.547 GWh. Neste setor estão contempladas as indústrias de produção do cimento.

Tabela 39 - Consumo de energia elétrica no setor de fabricação de produtos de minerais não-metálicos no Brasil, em 2021 [37].

Sector Industrial	Consumo (GWh)	Part. %
Fabricação de Produtos de Minerais Não-Metálicos	14.547	8,1

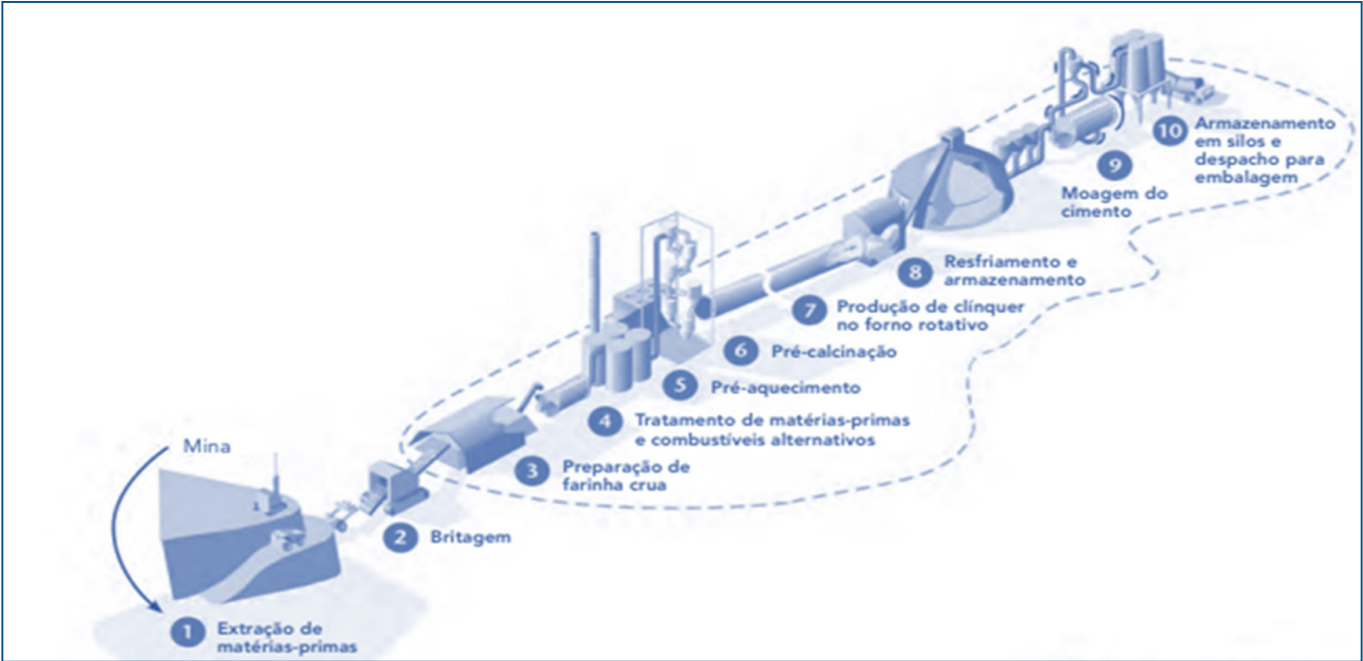


Figura 17 – Resumo do processo produtivo de fabricação do cimento (Adaptado de [36]).

Na Figura 18 é exposto o gráfico de evolução da matriz energética da produção de cimento no Brasil. Verifica-se que a fonte coque de petróleo é o energético mais utilizado nessas indústrias, com 69% de participação e, segundo os dados mais recentes, ele é o principal combustível utilizado nos fornos rotativos para produção do clínquer. O segundo recurso energético mais utilizado é a eletricidade, bastante relevante nas etapas que envolvem resfriamento e moagem. Logo, apesar desta indústria estar incluída em um dos setores que mais consomem eletricidade do país, a energia térmica é mais relevante em seu processo produtivo.

A Tabela 40 apresenta o resultado da avaliação qualitativa da relevância da indústria de produção de cimento no consumo de eletricidade do setor de fabricação de produtos de minerais não-metálicos e em relação ao setor elétrico como um todo.

Verifica-se que, apesar da matriz energética das indústrias de cimento serem mais dependentes da energia térmica devido ao grande volume de produção nacional, o consumo de eletricidade é bastante relevante dentro do setor de fabricação de minerais não-metálicos e para o setor industrial como um todo, uma vez que recebeu a avaliação médio nesse quesito.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 40 foi realizada a partir da estimativa quantitativa do consumo de eletricidade para o segmento de produção de cimento em relação ao consumo de eletricidade do setor industrial e do setor elétrico como um todo. Para o primeiro caso, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 8%, médio entre 8% e 20% e alto maior ou igual que 20%. No segundo caso, baixo equivale a participação menor que 2%, médio entre 2% e 6% e alto maior ou igual a 6%.

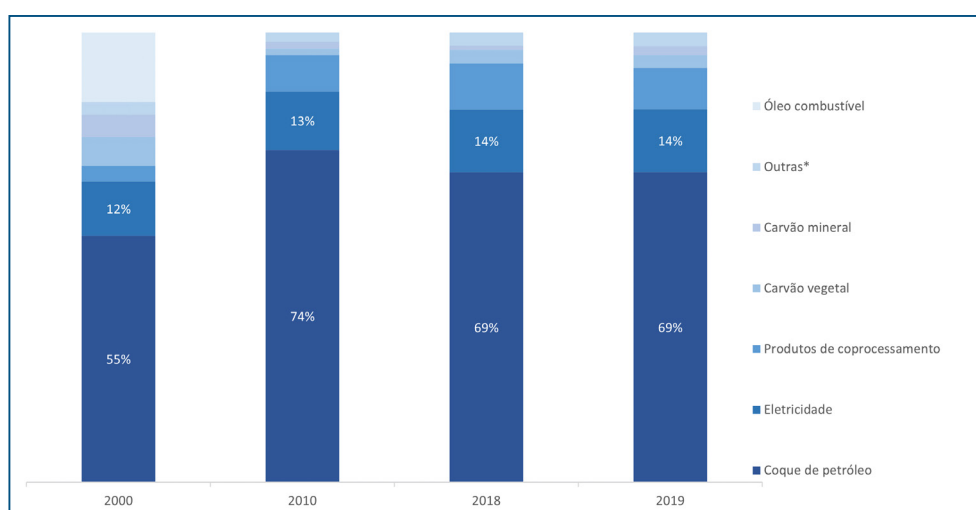


Figura 18 – Matriz energética da produção de cimento ao longo dos anos (Adaptado de [38]).

Tabela 40 – Avaliação da relevância da produção de cimento (Elaboração própria com dados de [33] e [38]).

Subsegmento	Relevância em relação ao consumo do setor de produtos não metálicos (%)
Produção de Cimento, usina integrada e moagem	Alto
Relevância do consumo do segmento de produção de cimento em relação ao setor industrial como um todo	Médio

4.4.4.2 Uso da energia elétrica no processo produtivo

Conforme apresentado anteriormente, a produção de cimento segmenta-se em plantas integradas e plantas somente de moagem do clínquer para fabricação do cimento. Logo, as análises apresentadas a seguir se dividem entre esses dois subsegmentos.

A Tabela 41 apresenta os valores de consumo específico médio total e elétrico para os subsegmentos da indústria do cimento. Nota-se que para as plantas integradas o consumo específico total é de 3,90 GJ/t e o elétrico de 0,4 GJ/t. Já para plantas que contam somente com a produção de cimento foi identificado somente o consumo específico elétrico, de 0,19 GJ/t, ou consomem 47% da eletricidade de uma usina integrada.

Considerando-se que cada um dos subsegmentos possui etapas dos processos produtivos distintos, realizou-se, na Tabela 42, uma análise qualitativa do nível de consumo de eletricidade por etapa do processo produtivo.

Verifica-se que nas plantas integradas a etapa de moagem do da mistura de clínquer e gesso para produção do pó do cimento é a mais relevante no consumo de eletricidade, seguida pela etapa de aquecimento da farinha nos fornos rotativos para produção do clínquer e pela etapa de moagem do calcário. Já nas usinas somente com a produção de cimento, destaca-se que a principal consumidora de eletricidade é a etapa da moagem.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 42, foi realizada a partir da estimativa quantitativa da distribuição percentual do consumo específico de eletricidade por etapa do processo produtivo para cada rota tecnológica. Nesse sentido, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 10%, médio entre 10% e 40% e alto maior ou igual que 40%.

Tabela 41 – Consumo de energia específico médio na produção de cimento (Elaboração própria com dados de [36] e [38]).

Subsegmento	Consumo Específico de Energia Total (GJ/t)	Consumo Específico de Energia Elétrica (GJ/t)
Produção integrada (clínquer e cimento)	3,90	0,40
Produção somente de cimento	Não disponível	0,19

Tabela 42 – Relevância do consumo de eletricidade para produção de cimento, por etapa do processo produtivo, para cada subsegmento (Elaboração própria com dados de [36] e [38]).

Subsegmento	Produção integrada (clínquer e cimento)	Produção somente de cimento
Prévio a moagem da matéria-prima	Baixo	Não se aplica
Moagem da matéria prima	Médio	Não se aplica
Moagem de combustíveis	Baixo	Não se aplica
Aquecimento em fornos rotativos	Médio	Não se aplica
Moagem de cimento	Alto	Alto
Outros (carregamento, ensacamento etc.)	Baixo	Baixo

Os principais equipamentos consumidores de eletricidade no subsegmento de usinas de produção de cimento integradas são os moinhos, que integram diferentes etapas do processo produtivo desde a preparação da matéria prima, britadores, esteiras de transporte de material, fornos rotativos e empacotadeiras. Já a plantas não integradas possuem apenas os equipamentos relativos à

produção do cimento em si, os moinhos de cimento e as empacotadeiras, conforme listado na Tabela 43.

Em termos de uso final associado ao consumo de eletricidade, conclui-se que é basicamente a força motriz, como pode se observar na relação dos principais equipamentos acionados por motores elétricos.

Tabela 43 – Principais equipamentos consumidores de energia elétrica na produção de cimento (Elaboração própria com dados de [38], [39]).

Equipamento	Produção integrada (clínquer e cimento)	Produção somente de cimento
Moinho de farinha crua	x	
Moinho de combustíveis	x	
Britador	x	
Correia transportadora	x	x
Forno rotativo	x	
Moinho de cimento	x	x
Empacotadeira	x	x

4.5 Indústria do cloro

4.5.1 Visão geral

Os produtos resultantes da indústria do cloro estão presentes em diversos setores da economia do país, uma vez que são produtos essenciais para sociedade, como por exemplo no setor de saneamento para assegurar a potabilidade da água e o tratamento do esgoto urbano.

Além do mais, é um insumo importante em indústrias estratégicas para o país, como petroquímicas, papel e celulose, alimentos e bebidas e siderúrgicas [40]. Na Figura 19 é apresentado a visão geral da cadeia produtiva do cloro.

A Tabela 44 apresenta os principais indicadores da produção anual de cloro no país ao longo de 2019 e 2020. Destaca-se que, em 2020, a produção de cloro atingiu a marca de 786.193 toneladas, uma variação negativa de 8,3% em relação ao ano anterior.

A redução da produção deste insumo no país pode ser explicada pelas informações aferidas na Figura 20, em que se verifica que o fator de utilização das indústrias tem apresentado uma redução ao longo de 2016 até 2020.

O fator de utilização médio em 2016 era de 79% e reduziu para 56% em 2019, apresentando um novo decréscimo em 2020, com 53% de utilização da capacidade instalada das indústrias.

É possível avaliar a distribuição regional da indústria de cloro no Brasil a partir da análise da capacidade instalação de produção de cloro das principais empresas do país, conforme ilustrado na Figura 21. Nota-se que 58% dessa capacidade instalada de produção de cloro se encontra na região Nordeste do país e 40% na região Sudeste, a região Sul tem uma participação pequena, de apenas 2%.

Já no que tange a distribuição da capacidade instalada de produção das principais empresas do país em termos união federativa, observa-se que o estado de São Paulo possui a maior participação com 34%, seguido dos estados da Bahia e Alagoas com 28% e 27% de participação respectivamente. Os estados do Espírito Santo, Pernambuco, Rio Grande do Sul e Rio de Janeiro, possuem uma participação conjunta de 11%.

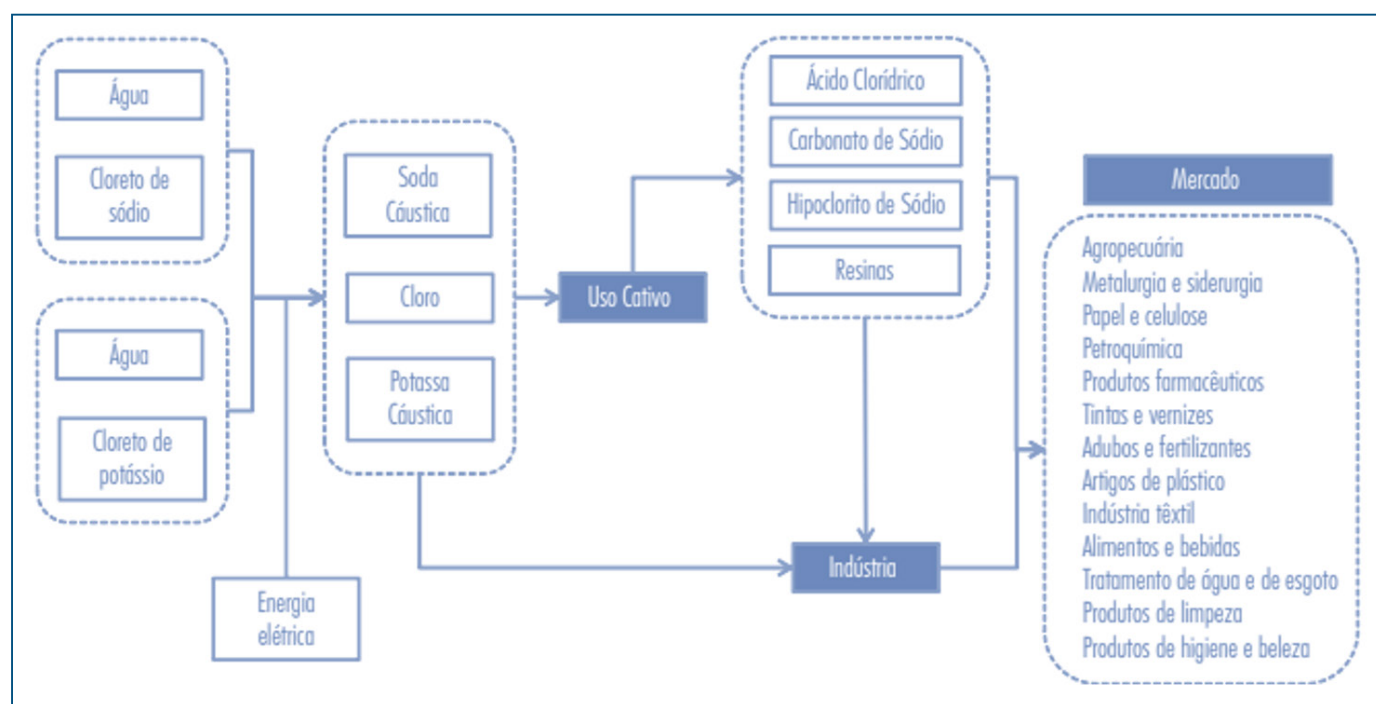


Figura 19 – Cadeia produtiva do cloro e derivados (Adaptado de [40]).

Tabela 44 – Indicadores da indústria de cloro no Brasil (Adaptado de [41]).

CLORO	Janeiro/Dezembro		Variação %
	2019	2020	
1. Produção	857297	786193	8.3
2. Uso Cativo	734199	682033	7.1
3. Vendas Totais	122894	104258	15.2
4. Capacidade Instalada	1527515	1484506	2.8
5. Nível de Utilização (%)	56.1	53	5.6
6. Importação	6260	6555	4.7
7. Consumo Aparente	863557	792748	8.2

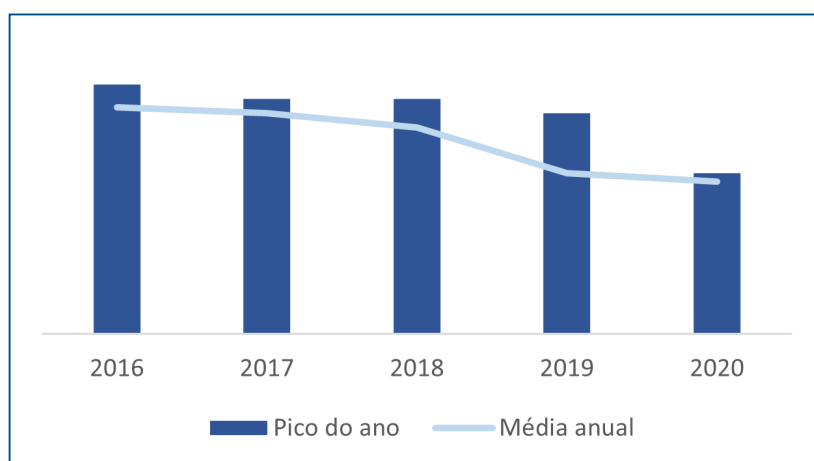


Figura 20 – Histórico do fator de utilização das indústrias de produção de cloro (Adaptado de [41]).

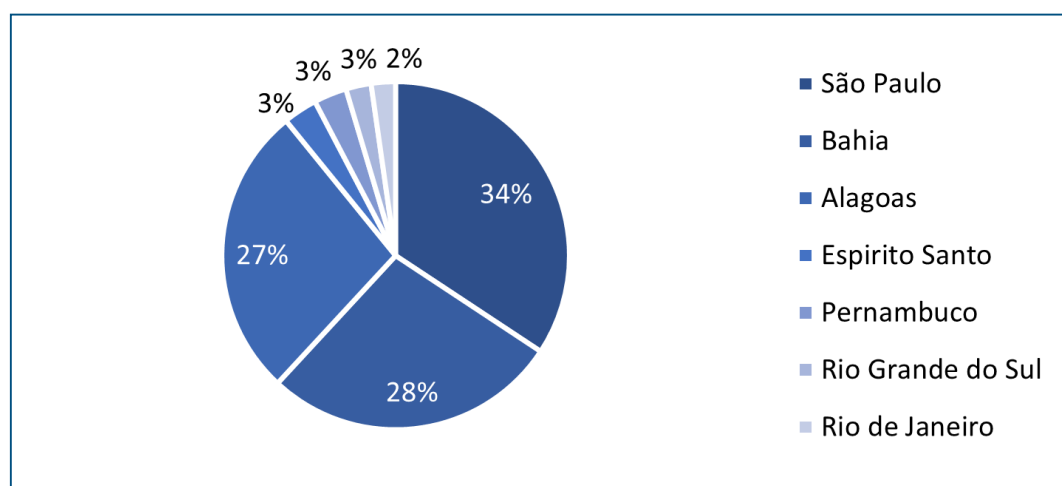


Figura 21 – Distribuição da capacidade instalada de produção de cloro por estado (Adaptado de [40]).

4.5.2 Principais empresas do setor

Segundo as informações da Associação Brasileira da Indústria de Álcalis, Cloro e Derivados (ABICLOR), em 2019 a capacidade instalada de produção da indústria de cloro estava dividida em nove indústrias, pertencentes a oito grupos econômicos diferentes, conforme apresenta a Tabela 45. Destaca-se que os grupos econômicos Braskem, Dow e Unipar representam aproximadamente 90% dessa capacidade instalada.

4.5.3 Processo produtivo

A produção de cloro necessita de três insumos principais: sal, água e eletricidade. Primeiramente, o sal é dissolvido em água para produção da salmoura, a qual é filtrada e rigorosamente controlada antes de ser enviada para as células eletrolíticas. Em seguida, ocorre a principal etapa do processo produtivo, a eletrólise, onde a energia elétrica é aplicada na solução de salmoura e há a produção de soda cáustica e cloro e, como subproduto, o hidrogênio. Posteriormente, o cloro passa pelas etapas de secagem, compressão e liquefação, tornando-se pronto para estoque e transporte. Já a soda cáustica, passa pela etapa de vaporização antes de ser enviada para estocagem [42]. Na Figura 22, resume-se o processo descrito.

Tabela 45 – Capacidade instalada de produção de cloro por empresa, em 2019 (Adaptado de [40]).

Empresa	Cidade	Estado	Capacidade instalada
Brasken-AL	Maceió	Alagoas	409.4
Chemtrade	Aracruz	Espírito Santo	47.8
CMP Celulose Riograndense	Guaíba	Rio Grande do Sul	35.4
Dow Brasil	Aratu	Bahia	415
Katrium	Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	34
Compass Minerals	Igarassú	Pernambuco	46.1
Unipar Indupa	Ribeirão Pires	São Paulo	160.2
Unipar Carbocloro	Cubatão	São Paulo	355
Total			1,502.9

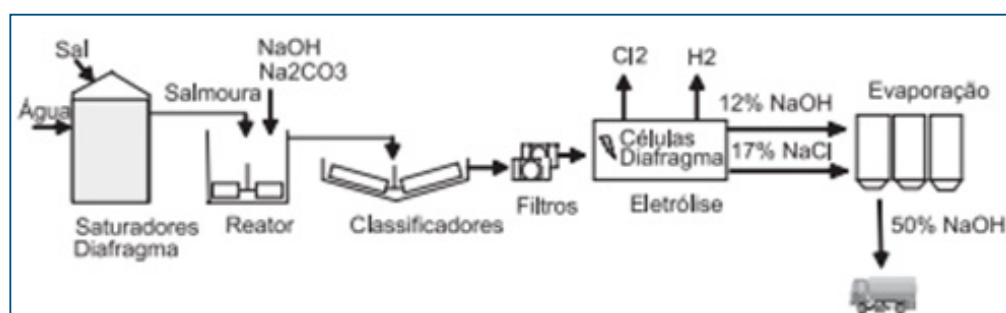


Figura 22 – Resumo do processo produtivo de cloro e soda cáustica [43].

Atualmente no país, três tecnologias são empregadas na etapa da eletrólise: células de mercúrio, de diafragma e de membrana. Contudo, o conceito de obtenção da soda e do cloro é o mesmo para as três tecnologias, em todos

os casos, os produtos são obtidos nos eletrodos devido a passagem de uma corrente elétrica de alta intensidade através da salmoura que circula em uma cuba denominada célula eletrolítica [40].

4.5.4 Uso da energia elétrica

4.5.4.1 Aspectos gerais

Conforme apresentado na Tabela 46, o segmento industrial da fabricação de produtos químicos foi o terceiro maior consumidor de energia elétrica do país em 2021, com 10,6 % de participação, equivalente a 19.024 GWh consumidos. Neste setor estão contempladas as indústrias produtoras de cloro.

Tabela 46 – Consumo de energia elétrica no setor de fabricação de produtos químicos no Brasil, em 2021 [44].

Setor Industrial	Consumo (GWh)	Part. %
Fabricação de Produtos Químicos	19.024	10,6

A matriz energética do segmento soda-cloro é, sobretudo, composta por eletricidade com 76,2% do seu insumo energético, principalmente devido a existência da etapa de eletrólise. Em seguida, destaca-se o gás natural, com 23,8%, como o segundo energético mais utilizado nessas indústrias, empregado nas etapas do processo industrial que necessita de energia térmica [45].

Além de possuir a eletricidade como o insumo energético mais importante de sua matriz, as indústrias de cloro figuram com uma classificação mediana entre as indústrias fabricantes de produtos químicos mais relevantes para esse setor em termos de consumo de eletricidade, conforme apresentado de forma qualitativa na Tabela 47.

Tabela 47 – Avaliação da relevância da produção de soda-cloro em relação ao consumo de eletricidade do setor de fabricação de produtos químicos e ao setor industrial como um todo (Elaboração própria com dados de [40]).

Subsegmento ou rota tecnológica	Relevância em relação ao consumo do setor industrial (%)
Produção de Cloro	Médio
Relevância do consumo do segmento de cloro em relação ao setor industrial	Baixo

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 47 foi realizada a partir da estimativa quantitativa do consumo de eletricidade por rota tecnológica em relação ao consumo de eletricidade do setor industrial e do setor elétrico como um todo. Para o primeiro caso o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 8%, médio entre 8% e 20% e alto maior ou igual que 20%. No segundo caso, baixo equivale a participação menor que 2%, médio entre 2% e 6% e alto maior ou igual a 6%.

4.5.4.2 Uso da energia elétrica no processo produtivo

A Tabela 48 apresenta o consumo específico de energia total no segmento de produção de cloro e o consumo específico somente de eletricidade. Observa-se que os valores de consumo específico corroboram com as informações apresentadas anteriormente, vale ressaltar que a eletricidade é responsável por 76,2% do consumo específico total, sendo o restante associado ao consumo de energia térmica.

Tabela 48 – Consumo de energia específico médio na produção de soda-cloro (Elaboração própria com dados de [40]).

Segmento	Consumo Específico de Energia Total (tep/t)	Consumo Específico de Energia Elétrica (tep/t)
Produção de Cloro	0,36562	0,2786

Na Tabela 49 destacaram-se as etapas do processo produtivo de cloro mais relevantes em termos de consumo de energia elétrica, em que a eletrólise é a etapa do processo mais representativa nesse quesito. Já a etapa de refrigeração do cloro e outras atividades, que são associadas ao uso da força motriz, como utilidades em geral e bombeamento possuem grau de relevância de consumo de eletricidade baixo.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 49 foi realizada a partir da estimativa quantitativa da distribuição percentual do consumo específico de eletricidade por etapa do processo produtivo para cada rota tecnológica. Nesse sentido, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 10%, médio entre 10% e 40% e alto maior ou igual que 40%.

Os principais equipamentos responsáveis pela demanda de eletricidade nas indústrias de produção de cloro são células eletrolíticas, compressores de cloro e compressores de fluido refrigerante.

A partir desses equipamentos, afere-se que as células eletrolíticas seriam os equipamentos responsáveis pelo maior consumo de eletricidade, uma vez que é a partir delas que ocorre a eletrólise.

Na Tabela 50 avalia-se a relevância de diferentes tipos de uso final de energia em relação ao consumo de eletricidade. A eletroquímica, tipo de uso que contempla a eletrolise, é quem mais se destaca e recebe o nível de avaliação alto. Já os outros tipos de uso final são menos relevantes para essa indústria e recebem a classificação baixa.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 50, foi realizada a partir da estimativa quantitativa da distribuição percentual do consumo específico de eletricidade por tipo de uso final de energia elétrica para cada rota tecnológica. Nesse sentido, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 10%, médio entre 10% e 50% e alto maior ou igual que 50%.

Tabela 49 – Relevância do consumo de eletricidade para produção de soda-cloro por etapa do processo produtivo (Elaboração própria com dados de [40]).

Etapa do processo produtivo	Produção de cloro
Eletrólise	Alto
Refrigeração do cloro	Baixo
Outros (associados a uso da força motriz: utilidades em geral, compressão, bombeamento etc.)	Baixo

Tabela 50 – Avaliação de destinação da energia elétrica por uso final (Adaptado de [40]).

Tipo de uso final	Produção de Cloro
Força motriz	Baixo
Iluminação	Baixo
Eletroquímica	Alto
Refrigeração	Baixo

4.6 Indústria do papel

4.6.1 Visão geral

A fabricação de papel é resultado do processamento industrial de fibras vegetais, em que cerca de 96% das fibras destinadas à fabricação de papel no Brasil são de origem arbórea e 4% são provenientes de bagaço de cana, sisal e bambu. A extração da madeira para a produção das fibras é totalmente mecanizada e sua industrialização acontece através de processo químico, que abrange 95% do total produzido no país, ou processo mecânico, que gera as pastas de alto rendimento [46].

Durante a pandemia, houve alta na demanda por papéis sanitários (*tissue*), o que amenizou a queda pela de manda de papel/escrita. Uma alta na demanda industrial por embalagens também aquece o setor de produção. A Figura 23 apresenta um resumo da cadeia produtiva do papel [46].

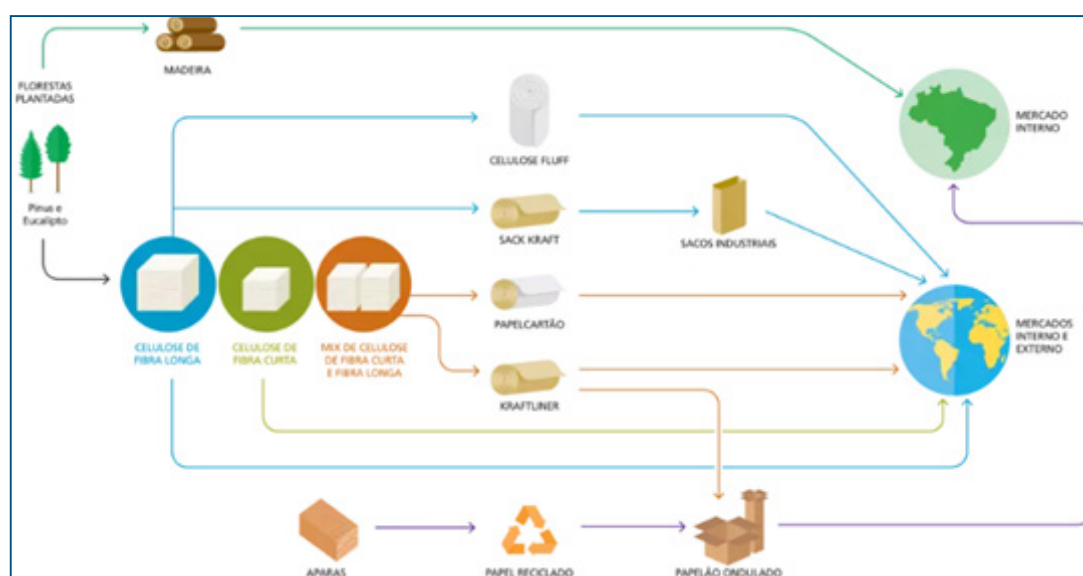


Figura 23 – Cadeia produtiva papel e celulose [47].

A Figura 24 apresenta os principais produtores mundiais de papel no ano de 2020. Observa-se que os principais produtores são a China e os Estados Unidos com 216,1 milhões de toneladas no total, e que o Brasil se encontra na 10ª posição com 10,2 milhões de toneladas produzidas.

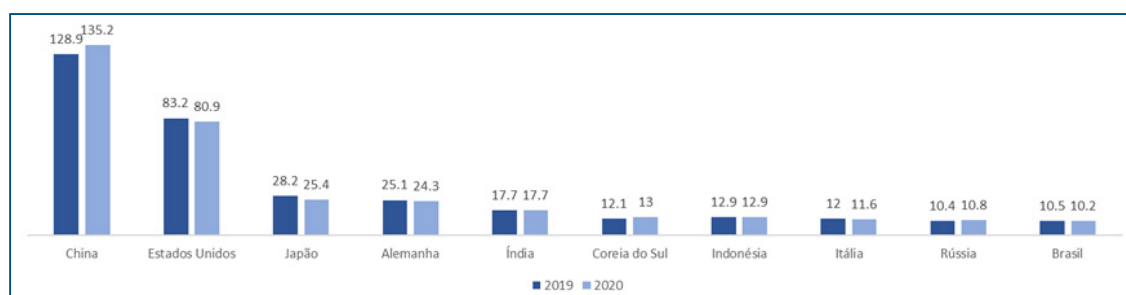


Figura 24 – Ranking da produção mundial de papel por milhões de toneladas [48].

A Figura 25 mostra os tipos de papéis atualmente produzidos no Brasil, sendo os principais ligados aos papéis para embalagens com 5,5 milhões de toneladas e para impressão ou escrita com 2,1 milhões de toneladas. Observa-se que este último apresenta forte queda anual em sua produção de 14,6%, enquanto o setor de embalagens apresenta alta de 0,3% e de papel cartão de 4,1%, demonstrando o aquecimento do mercado para embalagens de papel. Há também forte aumento de produção para o setor sanitário em virtude da pandemia de COVID-19.

Adicionalmente, a maior parte da produção de papel abastece o mercado interno, com cerca de 79,4% destinada a esse fim e 20,6% destinada à exportação no ano de 2020, constituindo um montante de 10,2 milhões de toneladas produzidos neste ano [48].

A distribuição da produção de papel no Brasil é concentrada no estado de São Paulo, sendo este o maior produtor com 41%, seguido pelo Paraná com 20,8% e por Santa Catarina com 19,2%. Esses três estados são responsáveis por 81% da produção total do país [49].

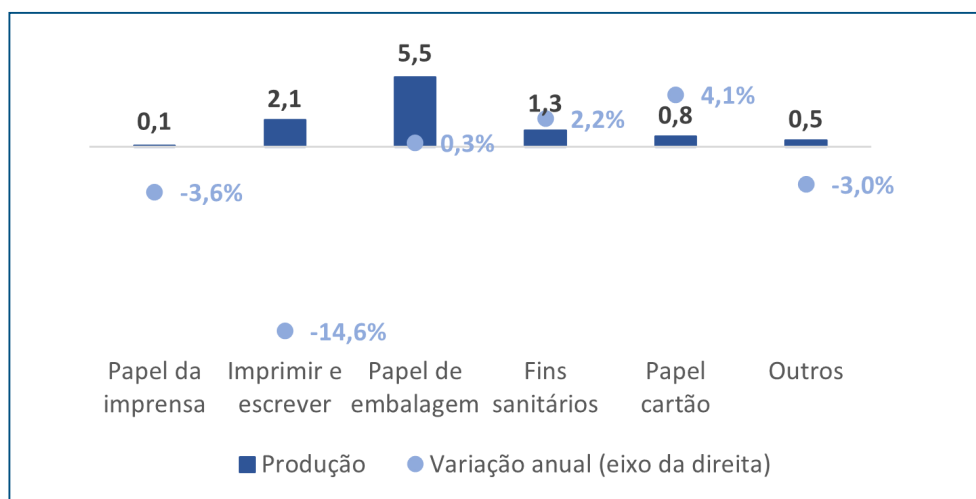


Figura 25 – Produção de papel por tipo, milhões de toneladas [48].

4.6.2 Principais empresas do setor

A Tabela 51 apresenta as principais produtoras de papel do país. Nota-se que diversas empresas possuem produção integrada de papel e celulose. Além disso, em vários casos, a empresa possui unidades tanto integradas quanto somente de papel ou somente de celulose.

A maior produtora do país em 2012 foi a Klabin, com 17,2% da produção nacional, seguida da Suzano Papel e Celulose com 12,8% e da Internacional Paper do Brasil com 10,2%. Nota-se que a maior parte da produção nacional provém de pequenas indústrias com 53,7% do mercado [49]. A Klabin, maior produtora de papel do país no território nacional, possui 23 fábricas em 10 estados do Brasil e produz produtos específicos em cada unidade [50].

Tabela 51 – Principais empresas mapeadas produtoras de papel do país [48].

Empresa	Subsegmento
ADAMI S/A	Papel
AHLSTROM	Papel
AMATA	Papel e Celulose
BO PAPER	Papel
COPAPA	Papel
FEDRIGONI	Papel
IBEMA	Papel
IGUAÇU	Papel e Celulose
IRANI	Papel
KLABIN	Papel e Celulose
MD PAPÉIS	Papel
MELHORAMENTOS	Papel
OJI PAPÉIS	Papel
PAPIRUS	Papel
PENHA	Papelão
RMS	Papel
SANTA MARIA	Papel
SANTHER	Papel
SOFTYS	Papel
SONOCO	Papel
STORAENSO	Papel
SUZANO	Papel e Celulose
SYLVAMO	Papel
VERACEL	Celulose
WEST ROCK	Embalagens Papelão
INTERNATIONAL PAPER	Papel e Celulose

4.6.3 Processo produtivo

O segmento de papel e celulose possui três subsegmentos principais: produção de celulose, produção de papel e produção integrada de papel e celulose, contudo, este relatório foca na análise somente no segmento da produção de papel. Conforme será explicado no tópico subsequente, nas indústrias integradas é bastante comum haver geração própria de eletricidade suficiente para abastecer todo o consumo da planta e, como este trabalho foca na resposta da demanda, esse segmento também não será considerado na análise.

Considera-se que a produção do papel possui 4 etapas principais: (i) desagregação, (ii) refino, (iii) depuração e (iv) máquina de papel, conforme ilustrado na Figura 26.

Na etapa da desagregação ocorre a fragmentação da pasta de celulose, realizado por grande batedor que movimentava a massa. Em seguida, a pasta de celulose passa pela etapa do refino, que consiste em aumentar o nível de resistência da celulose, também um processo mecânico onde o rotor pressiona o estator e a celulose passa entre eles. Nos processos de depuração há a limpeza da pasta pela retirada de corpos estranhos e contaminantes. Por fim, a última etapa é da máquina de papel onde a mistura passa por um processo com prensas e, posteriormente, secagem. Como resultado há o papel que receberá o acabamento conforme as especificações finais desejadas [51].

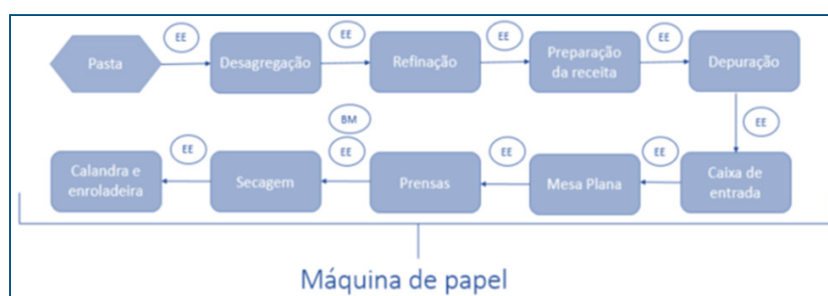


Figura 26 – Resumo do processo produtivo fabricação do papel (Adaptado de [51]).

4.6.4 Uso da energia elétrica

4.6.4.1 Aspectos gerais

Conforme apresentado na Tabela 52, o segmento industrial da fabricação de celulose, papel e produtos de papel encontra-se na sétima posição entre os maiores consumidores de eletricidade do país, com participação de 5% e consumo de 8.937 GWh.

A Figura 27 apresenta a matriz energética da indústria de papel e celulose, em que se observa que a fonte lixívia possui 52,2% de participação. A lixívia é um subproduto do processo de produção da celulose utilizado como combustível em caldeiras, responsáveis pela produção de vapor utilizado nos processos industriais e para produção de eletricidade por meio dos turbogeradores à vapor.

Tabela 52 – Consumo de energia elétrica no setor de fabricação de celulose, papel e produtos de papel no Brasil, em 2021 [52].

Sector Industrial	Consumo (GWh)	Part. %
Fabricação de Celulose, Papel e Produtos de Papel	8.937	5,0

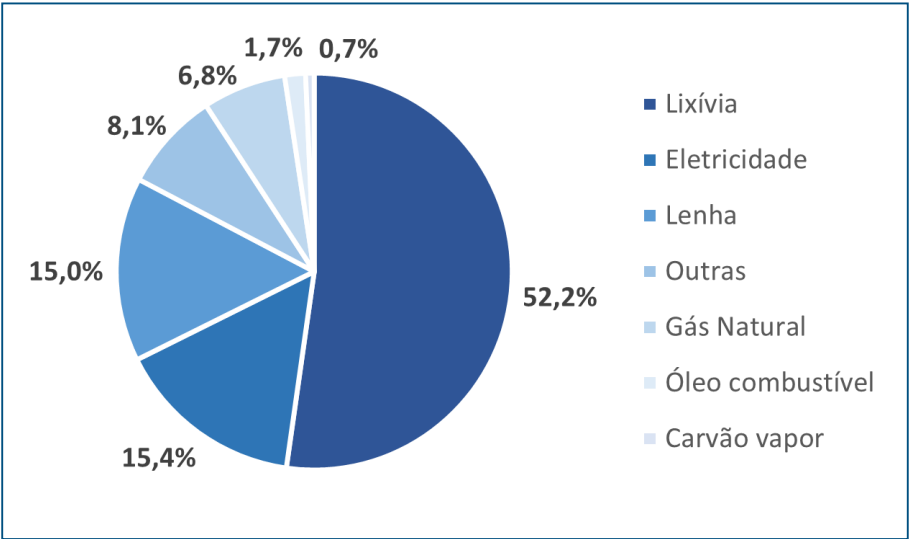


Figura 27 – Matriz energética da indústria de papel e celulose [53].

Considera-se que grande parte das indústrias com cogeração a base de lixívia, plantas de celulose e plantas integradas de papel e celulose são autossuficientes em eletricidade e, portanto, não serão objeto de estudo desse relatório. Este estudo foca nas indústrias de papel, que efetivamente demandam eletricidade da rede.

Apresenta-se na Tabela 53 uma análise qualitativa quanto à relevância por subsegmento de produção de papel em relação ao consumo de eletricidade do setor industrial de papel e celulose e ao setor industrial como um todo. Nota-se que, dentro do seu setor, as indústrias de papel receberam uma classificação alta em relação ao setor elétrico como um todo, que recebeu uma classificação de relevância média.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 53 foi realizada a partir da estimativa quantitativa do consumo de eletricidade no subsegmento de produção de papel em relação ao consumo de eletricidade do setor industrial e do setor elétrico como um todo. Para o primeiro caso, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 8%, médio entre 8% e 20% e alto maior ou igual que 20%. No segundo caso, baixo equivale a participação menor que 2%, médio entre 2% e 6% e alto maior ou igual a 6%.

Tabela 53 – Avaliação da relevância subsegmento de produção de papel em relação ao consumo de eletricidade setor industrial de papel e celulose e ao setor industrial como um todo. (Elaboração própria com dados de [48] e [51]).

Subsegmento	Relevância em relação ao consumo do setor de papel e celulose (%)
Produção de Papel	Alto
Relevância do consumo do segmento de papel em relação setor industrial como um todo	Médio

4.6.4.2 Uso da energia elétrica no processo produtivo

Na Tabela 54 são apresentados os valores de consumo específico médio para produção de papel. Nota-se que o consumo específico de energia é de 10,73 GJ para produção de 1 tonelada de papel e, no caso do consumo específico de energia elétrica, o valor é de 3,46 GJ/t, equivalente a 32,23% do consumo específico total.

Apresenta-se, na Tabela 55, uma análise qualitativa do nível de consumo de eletricidade por etapa do processo produtivo nas indústrias de fabricação de papel. Verifica-se que todas as etapas receberam uma avaliação de relevância média, exceto a etapa de formação da folha de papel, que recebeu a classificação alta. Isso implica que o consumo da formação da folha destoa do consumo das outras etapas, as quais apresentam um consumo razoavelmente distribuído.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 55 foi realizada a partir da estimativa quantitativa da distribuição percentual do consumo específico de eletricidade por etapa do processo produtivo para o subsegmento de produção de papel. Nesse sentido, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 10%, médio entre 10% e 40% e alto maior ou igual que 40%.

Conforme destacado em [51], os principais equipamentos que consomem eletricidade são majoritariamente aqueles acionados por motores elétricos, como púlpers, hidro ciclones, bombas e rolos e prensas. Tendo estes equipamentos em vista, é esperado que o tipo de uso final de energia força motriz seja o mais relevante nas indústrias de produção de papel. Essa expectativa é confirmada em função da avaliação apresentada na Tabela 56, em que se observa apenas dois tipos de usos finais de energia elétrica, onde a força motriz tem total dominância.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 56 foi realizada a partir da estimativa quantitativa da distribuição percentual do consumo específico de eletricidade por tipo de uso final de energia elétrica. Nesse sentido, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 10%, médio entre 10% e 50% e alto maior ou igual que 50%.

Tabela 54 – Consumo de energia específico médio na produção de papel, para diferentes rotas tecnológicas (Elaboração própria a partir dos dados de [51]).

Subsegmento	Consumo Específico de Energia Total (GJ/t)	Consumo Específico de Energia Elétrica (GJ/t)
Produção de Papel	10,73	3,46

Tabela 55 – Relevância do consumo de eletricidade para produção de papel por etapa do processo produtivo (Elaboração própria a partir dos dados de [51]).

Subsegmento ou rota tecnológica	Produção de papel
Preparo de massa	Médio
Formação da folha	Alto
Secagem e acabamento	Médio
Sistema auxiliares	Médio

Tabela 56 – Avaliação de destinação da energia elétrica por uso final na produção de papel (Elaboração própria a partir dos dados de [51]).

Tipo de uso final	Produção de papel
Força motriz	Alto
Iluminação	Baixo

4.7 Indústria de alimentos e bebidas

4.7.1 Visão geral

A indústria processadora final de alimentos e bebidas, no geral, é um segmento muito presente no cotidiano e para a economia do país, sendo responsável por 10,6% do PIB brasileiro. A cadeia produtiva dessa indústria toma início no fluxo da oferta de produtos agropecuários in natura ou pouco processados, que são direcionados a um processamento primário e posteriormente recebidos por essa indústria para a fabricação de seus produtos. Cerca de 58% da produção agropecuária é processada por essa indústria atualmente [54][55].

Destaca-se que essas empresas vêm buscando implementar mecanismos específicos de compra de fornecedores integrados, especializados ou até assumindo a etapa de produção dos insumos primários. Dessa forma, elas podem optar por dispensar ou não o pré-processamento e ainda obter aumento da qualidade e confiabilidade de seus produtos [54][55].

A Tabela 57 mostra a evolução em toneladas e litros, de 2016 a 2020, da produção brasileira da indústria de alimentos e bebidas. A partir da análise da tabela, conclui-se que não existe um crescimento significativo das produções a partir de 2017.

Visando o ano de 2020, ao analisar os alimentos apontados em toneladas, há um destaque para (i) fabricação de óleos vegetais em bruto (exceto óleo de milho) responsável por 27,91% da produção; (ii) fabricação de alimentos para animais com 26,11%; (iii) moagem de trigo e fabricação de derivados com 9,11%; (iv) beneficiamento de arroz e fabricação de produtos do arroz com 6,02%; e (v) fabricação de laticínios (toneladas) com 4,68%.

Na mesma linha de raciocínio, mas agora apontando os itens em litros, há um destaque para (i) preparação do leite (mil litros) responsável por 63,93%; (ii) fabricação de sucos de frutas, hortaliças e legumes (mil litros) 26,42%; e (iii) fabricação de laticínios (mil litros) 6,15% [56].

Tabela 57 – Evolução da produção da indústria de alimentos brasileira [57].

CLASSE CNAE	2016	2017	2018	2019	2020
Fabricação de conservas de frutas	2.515.302	5.431.950	2.749.776	3.582.958	2.680.053
Fabricação de conservas de legumes e outros vegetais	1.349.416	1.266.385	1.018.416	1.326.996	992.593
Fabricação de sucos de frutas, hortaliças e legumes (Mil litros)	3.399.375	3.755.096	3.873.025	5.046.552	3.774.821
Fabricação de óleos vegetais em bruto, exceto óleo de milho	32.060.900	36.700.050	35.111.470	34.690.132	36.077.738
Fabricação de óleos vegetais refinados, exceto óleo de milho	3.489.745	4.266.797	4.563.317	4.613.513	4.641.195
Fabricação de margarina e outras gord. veg. e de óleos não comestíveis de animais	1.796.113	1.771.923	2.160.002	2.138.402	2.335.135
Preparação do leite (Mil litros)	8.827.323	9.362.912	9.755.539	9.697.006	9.134.579
Fabricação de laticínios (Toneladas)	5.770.391	6.099.177	6.456.555	6.417.816	6.045.582
Fabricação de laticínios (Mil litros)	1.306.897	1.333.986	937.793	932.166	878.101
Fabricação de sorvetes e outros gelados comestíveis	338.206	467.264	399.988	397.588	374.528
Beneficiamento de arroz e fabricação de produtos do arroz	7.640.929	7.841.276	7.864.942	7.872.807	7.786.206
Moagem de trigo e fabricação de derivados	10.699.278	11.565.217	12.360.435	11.853.657	11.770.682
Fabricação de farinha de mandioca e derivados	258.903	225.750	261.851	264.993	268.968
Fabricação de farinha de milho e derivados, exceto óleos de milho	3.181.351	2.982.730	3.359.964	3.400.284	3.451.288
Fabricação de amidos e féculas de vegetais e de óleos de milho	3.030.764	3.084.966	2.756.637	2.789.717	2.831.562
Fabricação de alimentos para animais	28.158.305	31.791.817	32.860.156	33.254.478	33.753.295
Moagem e fabricação de prod. de origem vegetal não espec. anteriormente	522.617	333.481	573.268	580.147	588.849
Torrefação e moagem de café	677.540	772.878	784.786	797.343	777.409
Fabricação de produtos à base de café	131.870	144.511	126.323	128.344	125.136
Fabricação de produtos de panificação	1.552.431	1.829.487	1.887.878	1.901.093	1.933.412
Fabricação de biscoitos e bolachas	1.862.169	1.917.405	2.144.326	2.159.336	2.196.045
Fabricação de produtos derivados do cacau, de chocolates e confeitos	1.606.036	1.634.708	1.713.671	1.725.667	1.755.003
Fabricação de massas alimentícias	1.751.005	1.970.092	2.013.885	2.027.982	2.062.458
Fabricação de especiarias, molhos, temperos e condimentos	1.421.567	1.459.702	1.535.476	1.546.224	1.572.510
Fabricação de alimentos e pratos prontos	167.471	160.775	194.816	196.179	199.514
Fabricação de produtos alimentícios não espec. anteriormente (Toneladas)	3.373.817	3.580.957	4.919.195	4.953.629	5.037.841
Fabricação de produtos alimentícios não espec. anteriormente (Mil litros)	379.180	445.817	489.046	492.469	500.841
Total em Toneladas	113.356.126	127.299.298	127.817.132	128.619.286	129.257.001
Total em Milhares de Litros	13.912.775	14.897.811	15.055.403	16.168.193	14.288.342

No caso do setor de bebidas alcoólicas, no ano de 2020, vemos de acordo com a Tabela 58 que a “Fabricação de malte, cervejas e chopes” é responsável por mais da metade dessa produção (87,17%), seguida da “Fabricação de aguardentes e outras bebidas destiladas” (9,29%) e em menor quantidade temos a “Fabricação de Vinho” (3,54%).

Em termos da evolução da produção da indústria de bebidas não alcoólicas, com o auxílio da Tabela 59, vemos um grande salto produtivo de águas envasadas ao longo dos anos. Porém, em todos esses anos, a maior quantidade produzida é de “Fabricação de refrigerantes e de outras bebidas não alcoólicas” responsável por 74,55% no ano de 2017, enquanto a Fabricação de águas envasadas tem apenas 25,45% dessa produção [58].

Tabela 58 – Evolução da produção em milhares de litros da indústria de bebidas alcoólicas brasileira [56].

CLASSE CNAE	2016	2017	2018	2019	2020
Fabricação de aguardentes e outras bebidas destiladas	1.449.695	1.293.640	1.632.711	1.711.081	1.716.214
Fabricação de vinho	467.458	630.744	621.287	651.109	653.062
Fabricação de malte, cervejas e chopes ¹	13.880.510	13.714.714	15.319.532	16.054.870	16.103.034
Total	15.797.663	15.639.098	17.573.530	18.417.059	18.472.311

Tabela 59 – Evolução da produção em milhares de litros da indústria de bebidas não alcoólicas brasileira [58].

CLASSE CNAE	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Fabricação de águas envasadas	2.821.734	3.316.339	3.020.404	3.854.840	4.407.539	5.191.912	5.458.279	5.354.980	4.744.745	5.112.402
Fabricação de refrigerantes e de outras bebidas não alcoólicas ⁽¹⁾	14.114.237	14.639.783	17.059.501	17.053.877	17.995.997	16.440.441	17.609.834	15.706.286	14.806.358	14.975.734
Total	16.935.971	17.956.122	20.079.905	20.908.717	22.403.536	21.632.353	23.068.113	21.061.266	19.551.103	20.088.136

A Tabela 60 apresenta os dados de produção da indústria de carnes: bovina, frangos e suína. A produção de frango foi a maior entre as carnes em 2021 e atingiu 14,15 milhões de toneladas. Já a produção de carne bovina encontra-se em segundo lugar, com a marca de 10,40 milhões de toneladas. A produção carne suína tem apresentado historicamente um menor volume de produção em comparação aos seus pares e, em 2021, totalizou 4,25 milhões de toneladas.

Em termos de destaques da participação mundial da produção de alimentos e bebidas oriundas do Brasil, segundo o par produção e exportação, observa-se o quão grande é o país no setor da agroindústria, sendo o segundo maior exportador de alimentos industrializados do mundo, em volume, e o quinto em valor [60].

Tabela 60 – Desempenho de indicadores da avicultura, bovinocultura de corte e suinocultura no Brasil (milhões de toneladas) [59].

Atividade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Frangos	13,55	13,52	13,61	13,36	13,69	13,88	14,15
Bovinos	9,43	9,28	9,55	9,90	10,20	10,10	10,40
Suínos	3,52	3,70	3,73	3,76	3,98	4,13	4,25

4.7.2 Principais empresas do setor

Na Tabela 61 consta o ranking das dez principais empresas com participação de mercado na fabricação de produtos alimentícios embalados do Brasil e do mundo. No país, a Nestlé S/A é a maior empresa na participação dessa produção alimentícia, chegando a ser quatro vezes maior que o 10º lugar no ranking, em 2019. Em segundo e terceiro lugar há, respectivamente, a Lactalis Groupe e Mondelez International Inc [57].

Tabela 61 – Ranking de participação de mercado, empresas fabricantes de produtos alimentícios [57].

Posição	Mundo		Brasil	
	Empresa	Participação (%)	Empresa	Participação (%)
1	Nestlé S/A	2,60	Nestlé S/A	6,20
2	PepsiCo Inc.	2,10	Lactalis, Groupe	4,00
3	Mondelez International Inc.	1,70	Mondelez International Inc.	3,30
4	Danone, Groupe	1,30	PepsiCo Inc.	2,40
5	Kraft Heinz Co.	1,30	Brf Brasil Foods S/A	2,10
6	Unilever Group	1,20	Unilever Group	2,00
7	Mars Inc.	1,20	Danone, Groupe	1,90
8	Lactalis, Groupe	0,90	M Dias Branco S/A Indústria e Comércio de Alimentos	1,90
9	Ferrero & related parties	0,80	Bunge Ltd.	1,60
10	Inner Mongolia Yili Industrial Group Co Ltd	0,80	Cargill Inc	1,50

De acordo com a Tabela 62, o mercado brasileiro de bebidas não alcoólicas é praticamente dominado pela Coca Cola Company, com cinco produtos no top 10 mais consumidos e 30,6% de volume no mercado nacional, em 2018. A disparidade é perceptível quando comparamos ao segundo colocado, Anheuser-Busch Inbev, dona da marca Guaraná Antártica, com apenas 5,3% de volume no mercado do país [58].

Tabela 62 – Ranking de participação de mercado, empresas fabricantes de bebidas não alcoólicas [58].

Empresa ou Grupo Empresarial	Marcas entre as 10 mais consumidas	% Mercado Nacional 2018 (em volume)
The Coca Cola Company	Coca-cola (1), Fanta (2), Kuat (6), Del Valle (7), Coca-cola Zero (8), Sprite (9).	30,6
Anheuser-Busch Inbev	Guaraná Antártica (4)	5,3
Heineken NV	Guaraná Schin (3)	3,7
Grupo Edson Queiroz	Água Mineral Indaiá (5)	3,7
Pepsi Co. Inc.	Pepsi (10)	3,6
Britvic Plc		0,8
Groupe Danone		0,7
Wow Indústria e Comércio Ltda		0,6
Houchens Industries Inc		0,5
Viton 44 Indústria, Comércio e Exportação de Alimentos Ltda		0,3

A Tabela 63 mostra as empresas líderes do mercado brasileiro de bebidas alcoólicas e, como mostrado anteriormente neste relatório, é evidente que esse mercado é composto em sua maior parte pela produção de cerveja. A empresa líder desse setor é a Anheuser-Busch

Inbev, com a produção de cerveja, sendo responsável por 54% do volume no mercado nacional. O segundo e terceiro lugar nesse ranking são ocupados, respectivamente, pela Heineken NV com 17,9% do volume e Cervejaria Petrópolis S/A com 11,8% desse mesmo volume de mercado [56].

Tabela 63 – Ranking de participação de mercado, empresas fabricantes de bebidas alcoólicas [56].

Empresa ou Grupo Empresarial	Tipo de bebida dos principais produtos	% Mercado Nacional 2019 (em volume)
Anheuser-Busch Inbev	Cerveja	54,0
Heineken NV	Cerveja	17,9
Cervejaria Petrópolis S/A	Cerveja	11,8
Cia. Muller de Bebidas Ltda.	Cachaça, <i>spirits</i> e RDT's	0,8
Diageo Plc	Cerveja, uísque, vodca	0,8
Indústrias Reunidas de Bebidas Tatuzinho/3 Fazendas Ltda.	Cachaça, vodca e gin	0,5
Engarrafamento Pitú Ltda.	Cachaça, RDT's/HS	0,4
Campari Milano SpA, Davide	<i>Spirits</i>	0,3
Arbor Brasil Indústria de Bebidas Ltda.	Cerveja, vinho, <i>spirits</i> , RDT's	0,3
Pernod Ricard Groupe	Uísque, vodca, gin, rum	0,3

4.7.3 Processo produtivo

Conforme apresentado anteriormente, o setor de alimentos e bebidas é bastante vasto e abrange diversos subsegmentos da indústria processadora. Este trabalho focará nos subsegmentos que possuem informações disponibilizadas [61] e que são, também, setores relevantes para o país tanto em volume de produção quanto em posicionamento no cenário internacional, tal como exposto no tópico sobre visão geral.

Salienta-se que o segmento da fabricação de açúcar não será foco deste estudo devido ao fato de serem, em geral, indústrias autossuficientes em energia elétrica durante o período de safra, conforme será detalhado no tópico sobre o uso da eletricidade.

Por fim, destaca-se que não haverá detalhamento de todas as etapas do processo produtivo para cada subsegmento do setor de alimentos e bebidas e, para resumir esta parte do trabalho, apresenta-se uma visão das principais etapas do processo vinculada a cada indústria.

Com isso, os processos produtivos analisados nesta parte do trabalho são: (i) moagem de trigo, fabricação de massas alimentícias e produtos de padaria; (ii) produção de óleos e gorduras (moagem de grãos, produção de farelo, óleos vegetais e gordura animal); (iii) abate de animais e produção de carnes e derivados; (iv) beneficiamento de leite e fabricação de produtos lácteos; (v) fabricação de rações e alimentos para animais; (vi) produção de bebidas; e (vii) beneficiamento de arroz (ou genericamente beneficiamento de café, chá e cereais) [61].

A Tabela 64 apresenta as principais etapas contidas nos processos produtivos das indústrias de processamento de alimentos e bebidas e o respectivo subsegmento ao qual a etapa pertence. A descrição do processo será detalhada de acordo com a necessidade no tópico sobre uso da eletricidade no processo produtivo.

Tabela 64 – Principais etapas do processo produtivo para os subsegmentos da indústria de alimentos selecionados (Elaboração própria com dados de [61]).

Subsegmento/ Etapa processo produtivo	Moagem de Trigo	Produção de Óleos e gorduras	Abate de animais e produção de carnes e derivados	Beneficia- mento de leite e produtos lácteos	Fabricação de ração e alimentos para animais	Produção de Bebidas (cerveja)	Beneficia- mento de arroz
Recepção/ Limpeza							
Moagem							
Umidificação							
Secagem							
Quebra							
Descasque/ Peneira							
Laminação							
Corte							
Pendura							
Refrigeração/ Resfriamento							
Pasteurização							
Extrusão							
Mostura							
Fervura							
Fermentação							
Filtração							
Maturação							
Armazenagem							

4.7.4 Uso da energia elétrica

4.7.4.1 Aspectos gerais

O segmento industrial de fabricação de produtos alimentícios e bebidas, juntos, representam o segmento com o segundo maior consumo de eletricidade do país, apenas atrás da metalurgia, conforme verifica-se na Tabela 65. Observa-se que o consumo desses setores somados representa 14,63% do consumo do Brasil, equivalente a 26.191 GWh.

Tabela 65 – Consumo de energia elétrica no setor de produtos alimentícios e bebidas no Brasil em 2021 [62].

Setor Industrial	Consumo (GWh)	Part. %
Fabricação de Produtos Alimentícios	23.417	13,1
Fabricação de Bebidas	2.774	1,6

A Figura 28 apresenta a visão geral da matriz energética das indústrias de alimentos e bebidas, em que se verifica que o bagaço de cana é o principal energético desse segmento, com 74% de participação. A eletricidade aparece na segunda posição com 10,30% de participação.

Sabe-se que o bagaço de cana é um subproduto do processo produtivo de fabricação açúcar e álcool e pode ser utilizado como combustível nos processos de cogeração de energia térmica e eletricidade. Com isso, grande parte das usinas de açúcar são autossuficientes em energia durante o período de safra, consumindo eletricidade da rede apenas em momentos de parada dos turbogeradores ou em proporção menor durante a entressafra [62][64][65].

Devido ao fato de o objetivo deste trabalho ser analisar a resposta da demanda e, portanto, identificar consumidores que constantemente demandam potência do setor elétrico, o segmento de açúcar não será objeto de estudo deste trabalho.

Na Figura 29, ilustra-se o cenário da matriz energética do segmento de alimentos e bebidas excluindo o bagaço de cana. Nota-se que a eletricidade assume o papel de insumo energético mais relevante com 39,46%, enquanto os outros insumos que compõem a matriz são associados à geração de energia térmica, com destaque para a lenha (37,16%) e o gás natural (12,64%).

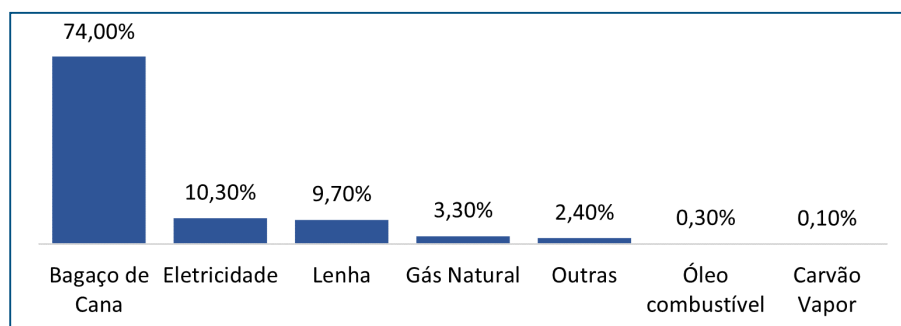


Figura 28 – Matriz energética do segmento de alimento e bebidas (Elaboração própria com dados de [63]).

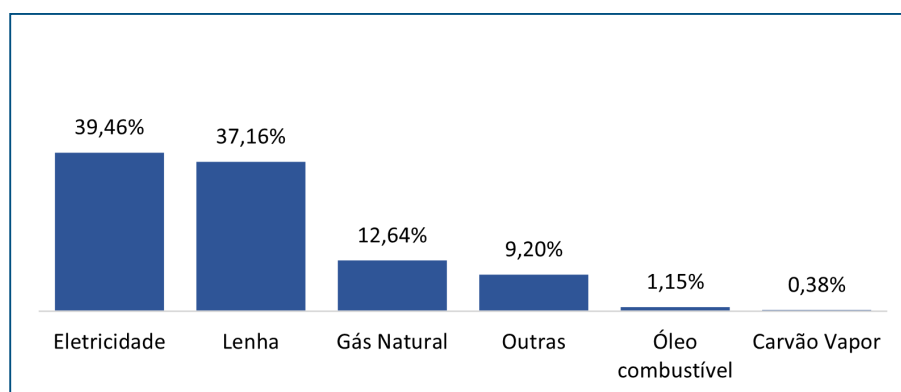


Figura 29 – Matriz energética do segmento de alimento e bebidas, excluindo a fonte bagaço de cana (Elaboração própria com dados de [63]).

Já na Figura 30, busca-se identificar a visão geral da matriz energética para cada subsegmento selecionado da indústria de alimentos e bebidas. Verifica-se que a eletricidade tem uma participação de pelo menos 30% na matriz de todos os subsegmentos, exceto no segmento de bebidas, no qual a principal fonte é o GLP.

Logo, as análises das matrizes energéticas já são um indicativo de que, de modo geral, a eletricidade é bastante relevante no segmento de alimentos e bebidas. A Tabela 66 apresenta a avaliação da relevância dos subsegmentos da indústria de produção de alimentos e bebidas selecionados em relação ao segmento como um todo e em relação ao setor industrial.

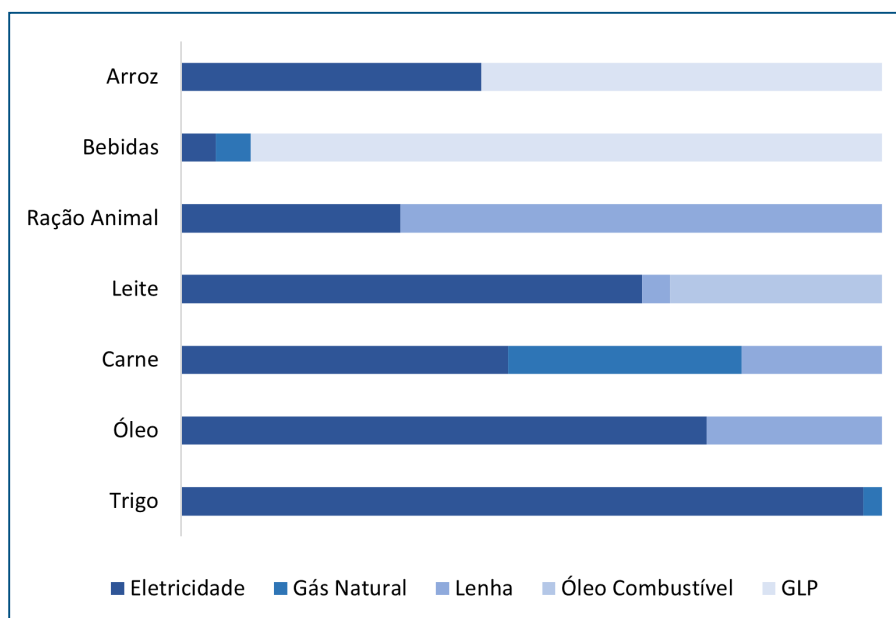


Figura 30 – Matriz energética do segmento de alimento e bebidas, excluindo a fonte bagaço de cana (Elaboração própria com dados de [61]).

Tabela 66 – Avaliação da relevância da produção de subsegmentos (Elaboração própria com dados de [56], [57], [58] e [61]).

Subsegmento	Relevância em relação ao consumo do segmento de alimentos e bebidas (%)
Produção de Trigo	Baixo
Produção de Óleo	Médio
Produção de Abate de Carne	Baixo
Produção de Leite	Alto
Produção de Ração Animal	Médio
Produção de Bebidas (Cerveja, refrigerante, suco)	Baixo
Produção de Arroz e Café	Baixo
Relevância do consumo do segmento de alimentos e bebidas em relação ao setor industrial	Alto

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 66 foi realizada a partir da estimativa quantitativa do consumo de eletricidade por rota tecnológica em relação consumo de eletricidade do setor metalúrgico e do setor industrial como um todo. Para o primeiro caso, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 5%, médio entre 5% e 15% e alto maior ou igual que 20%. No segundo caso, baixo equivale a participação menor que 2%, médio entre 2% e 6% e alto maior ou igual a 6%.

4.7.4.2 Uso da energia elétrica no processo produtivo

A análise do uso da eletricidade em cada etapa dos processos produtivos para as indústrias de alimentos e bebidas será realizada de forma diferente do que foi feito para os outros segmentos industriais estudados neste projeto. Isso se dá devido ao fato da informação da distribuição do consumo de eletricidade em cada uma dessas etapas não ter sido encontrado.

Logo, conforme observa-se na Tabela 67, as etapas dos processos mais relevantes em termos de consumo de eletricidade estão listadas sem a atribuição de um nível qualitativo (alto, médio ou baixo). No entanto, vale ressaltar que estas possuem relevância em termos de consumo de eletricidade e, quando possível, identifica-se entre elas a mais relevante.

Tabela 67 – Etapas do processo produtivo relevantes para os subsegmentos (Elaboração própria com dados de [61]).

Subsegmento / Etapa processo produtivo	Moagem de trigo	Produção de óleos e gorduras	Abate de animais e produção de carnes e derivados	Beneficiamento de leite e produtos lácteos	Fabricação de ração e alimentos para animais	Produção de bebidas (cerveja)	Beneficiamento de arroz
Recepção / Limpeza							
Moagem	Principal consumidor de eletricidade				Principal consumidor de eletricidade		
Secagem							
Quebra (peletização)		Principal consumidor de eletricidade			Principal consumidor de eletricidade		
Descasque / Peneira							
Laminação							
Corte / Evisceração							
Refrigeração / Resfriamento				Principal consumidor de eletricidade		Principal consumidor de eletricidade	
Pasteurização							
Extrusão					Principal consumidor de eletricidade		
Mostura							
Fervura							
Fermentação							
Filtração							
Maturação							
Armazenagem/Envase / Embalagem							

4.8 Indústria do saneamento

4.8.1 Visão geral

O saneamento compreende quatro principais áreas: (i) o abastecimento de água; (ii) a limpeza urbana e o manejo dos resíduos sólidos; (iii) o manejo e drenagem das águas pluviais urbanas; e (iv) o esgotamento sanitário. O abastecimento de água corresponde à coleta e transporte da água para o uso final. A limpeza urbana lida com o destino dos rejeitos, que não são mais úteis para sociedade. A drenagem pluvial resolve o problema de direcionar corretamente as águas das chuvas. Por fim, o esgoto sanitário dedica-se a gerir o envio da água utilizada novamente para a natureza [66].

Este trabalho foca na área responsável pelo abastecimento de água, por ser a parte do saneamento mais relevante em termos de consumo de eletricidade, conforme é apresentado no decorrer desse relatório. A Figura 31 apresenta a avaliação do nível de acesso ao saneamento no país em relação à população total e em relação à população rural. O nível de acesso é classificado em atendimento precário, atendimento adequado e sem atendimento. Destaca-se que, para o abastecimento de água, área foco deste relatório, 57,7% da população geral é classificado como tendo atendimento adequado, 39,8% como atendimento precário e 2,7% com atendimento precário. Afere-se desses resultados que esta área ainda tem um potencial de grande crescimento no país, uma vez que em torno de 40% da população ainda não possui atendimento adequado.

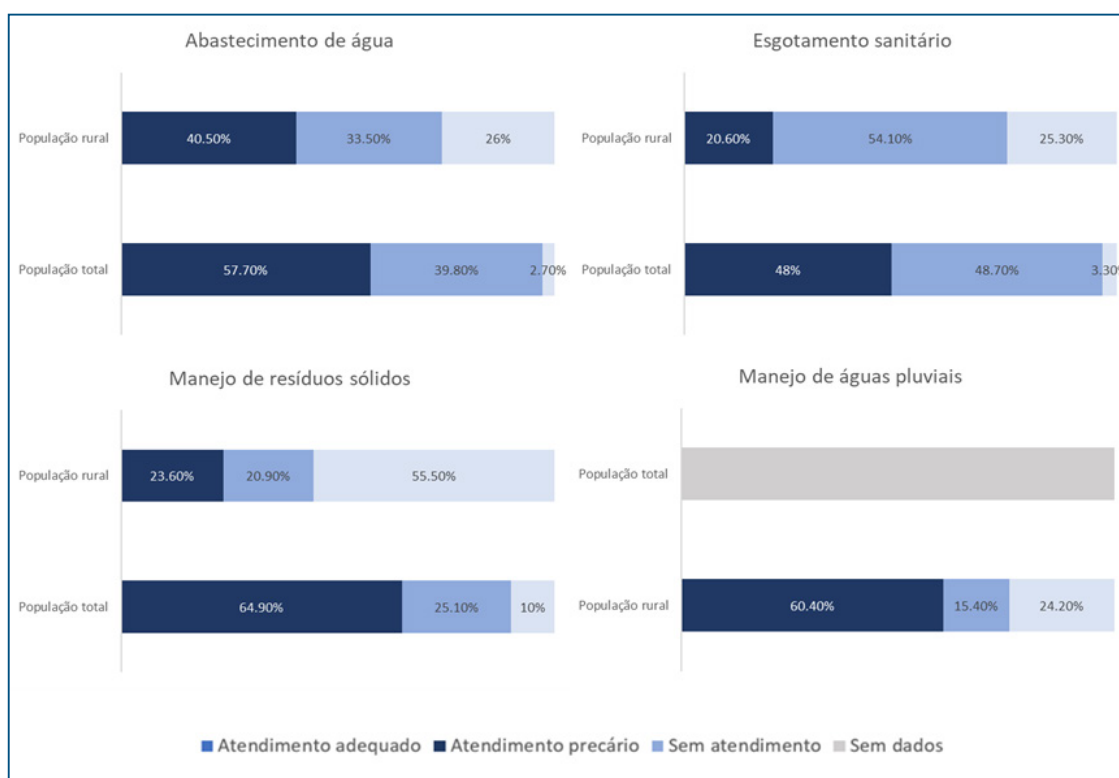


Figura 31 – Avaliação do nível de acesso ao saneamento no país [67].

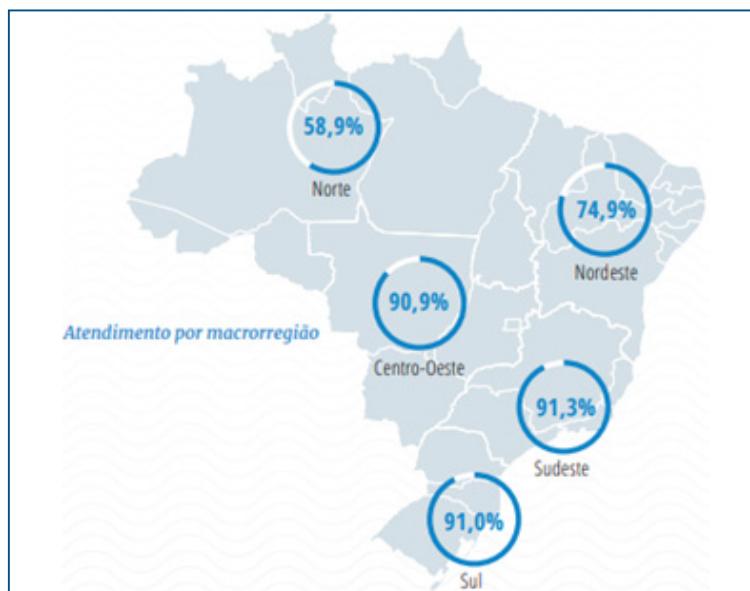


Figura 32 – Atendimento por abastecimento de água por macrorregião geográfica [66].

A Figura 32 apresenta a distribuição percentual do atendimento do abastecimento de água por macrorregião geográfica. Observa-se que as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste possuem abastecimento acima de 90%, enquanto a região Nordeste 74,9% e a região Norte com o menor índice de atendimento, 58,9%. Nota-se que a diferença das condições socioeconômicas é refletida nos índices de abastecimento [66].

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS), referente ao abastecimento de água em 2020, o consumo médio da população atendida é de 152,1 litros por habitante por dia. A população atendida corresponde a 175 milhões de habitantes e é importante considerar que há uma perda de 40,1% de água potável não contabilizada ou perdida na distribuição [68]. A partir dessas informações é possível calcular que o volume de água distribuído pelas empresas de abastecimento anualmente é de 24,2 trilhões de litros.

4.8.2 Principais empresas do setor

A Figura 33 apresenta os principais indicadores de saneamento básico das capitais do país com o intuito de ilustrar quais seriam as principais empresas desse setor, tendo em vista que as capitais tendem a ter uma maior densidade populacional e, coincidentemente, maior demanda por água.

Destaca-se que as cidades com maior população são Paulo, Rio de Janeiro, Brasília, Salvador, Fortaleza e Belo Horizonte, atendidas pelas empresas SABESP, CADAÉ/FABZO, CAESB, EMBASA, CAGECE e COPASA, respectivamente.

Município	Ranking 2022	Ranking 2021	Δ Ranking	Operador	População Total (IBGE)	Indicador de Atendimento Total de Água (%)	Indicador de Atendimento Urbano de Água (%)	Indicador de Atendimento Total de Esgoto (%)	Indicador de Atendimento Urbano de Esgoto (%)	Indicador de Esgoto Tratado Referido à Água Consumida (%)	Investimento Total dos Últimos Cinco Anos (R\$ MM)
São Paulo	4	8	4	SABESP	12.325.232	99,30	100,00	96,30	97,00	74,13	11.152,23
Curitiba	12	16	4	SANEPAR	1.948.626	100,00	100,00	99,98	99,98	95,09	669,17
Brasília	15	20	5	CAESB	3.055.149	99,00	99,00	90,90	90,90	90,03	1.462,34
Palmas	18	13	-5	SANEATINS	306.296	98,66	100,00	86,92	89,51	63,30	193,77
Goiânia	20	18	-2	SANEAGO	1.536.097	99,07	99,50	92,71	93,06	72,10	403,20
Campo Grande	28	33	5	AG	906.092	100,00	100,00	87,17	88,36	61,06	543,42
Boa Vista	31	27	-4	CAER	419.652	97,70	99,90	88,00	90,07	86,13	274,45
João Pessoa	36	36	0	CAGEPA	817.511	99,93	100,00	81,60	81,90	79,81	107,87
Belo Horizonte	37	37	0	COPASA	2.521.564	95,42	95,40	93,70	93,70	77,44	463,69
Salvador	39	63	24	EMBASA	2.886.698	98,80	98,80	88,05	88,07	100,00	705,85
Porto Alegre	43	42	-1	DMAE	1.488.252	100,00	100,00	91,48	91,48	52,42	410,57
Rio de Janeiro	44	43	-1	CEDAE FABZO	6.747.815	100,00	100,00	87,95	87,95	84,24	1.022,34
Vitória	53	48	-5	CESAN	365.855	93,72	93,70	80,84	80,84	87,00	119,33
Cuiabá	55	60	5	CBA	618.124	98,13	100,00	63,75	64,96	57,11	659,32
Florianópolis	60	69	9	CASAN	508.826	100,00	100,00	65,29	67,86	57,84	253,64
Aracaju	63	56	-7	DESO	664.908	98,89	98,90	53,50	53,50	51,87	328,29
Natal	72	72	0	CAERN	890.480	95,97	96,00	43,27	43,27	55,07	628,74
Fortaleza	76	76	0	CAGECE	2.686.612	77,27	77,30	55,34	55,34	59,17	687,85
Recife	83	81	-2	COMPESA	1.653.461	89,45	89,50	44,01	44,01	75,02	823,47
Teresina	84	83	-1	AGESPISA AT	868.075	96,23	100,00	35,74	37,91	22,62	360,77
São Luís	85	80	-5	CAEMA	1.108.975	85,73	90,80	49,78	52,70	20,78	320,92
Manaus	89	89	0	MA	2.219.580	97,50	98,00	21,95	22,06	24,14	657,01
Maceió	91	85	-6	CASAL	1.025.360	89,61	89,70	43,03	43,06	50,58	110,79
Belém	96	96	0	COSANPA	1.499.641	73,41	74,00	17,14	17,29	3,61	467,38
Rio Branco	97	92	-5	DEPASA	413.418	53,16	57,70	21,29	23,12	36,39	66,76
Porto Velho	99	99	0	CAERD	539.354	32,87	36,10	5,88	5,16	0,00	108,24
Macapá	100	100	0	CAESA	512.902	37,56	37,60	10,78	11,26	28,43	28,84
Total					50.534.555	94,49	95,01	76,21	76,62	68,02	23.030,27

Figura 33 – Principais indicadores de saneamento básico das capitais do país [69].

A Figura 34 resume informações sobre os prestadores de serviço de abastecimento de água que foram contemplados pela coleta de dados do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS). Verifica-se que em torno de 90% dos prestadores de serviço são de administração pública.



Figura 34 – Prestadores de serviço de abastecimento de água [70].

4.8.3 Processo produtivo

O processo de abastecimento de água pode ser subdividido em três etapas principais: a captação, o tratamento e o armazenamento da água tratada. A captação consiste em obter a água de um manancial capaz de suprir a demanda da população, podendo ocorrer em águas superficiais ou subterrâneas.

A segunda etapa do processo produtivo consiste no tratamento da água captada, que ocorre de acordo com as seguintes fases [66]:

- Adição de produtos químicos;
- Coagulação e flotação, com o intuito de identificar os particulados existentes na água captada;
- Decantação, cujo objetivo é fazer com que os particulados se acumulem no fundo do tanque de sedimentação;
- Filtração, onde as partículas restantes são filtradas por um material filtrante. Com isso, a água encontra-se praticamente livre de partículas;

- Por fim, na desinfecção, ocorre a adição de cloro e outros produtos desinfetantes para controlar a disseminação de doenças.

Dessa forma, a água em condições de uso é enviada para os reservatórios de água tratada e, posteriormente, para os consumidores finais pela rede de distribuição [66].

4.8.4 Uso da energia elétrica

4.8.4.1 Aspectos gerais

A Figura 35 ilustra o histórico dos últimos dez anos de consumo de eletricidade no setor de serviços públicos que, em 2021, atingiu a maior marca de consumo dos últimos 10 anos, com 16.668 GWh. Neste setor estão contempladas as informações de consumo de energia elétrica exclusivo para motores, máquinas e cargas essenciais à operação de serviços públicos de água, esgoto, saneamento e tração elétrica urbana ou ferroviária, explorados diretamente pelo Poder Público ou mediante concessão ou autorização [71].

Para compreender a ordem de grandeza do consumo de eletricidade desse setor é possível compará-lo com os outros setores industriais apresentados neste trabalho. Verifica-se que o setor de serviços públicos possui consumo de eletricidade que se enquadraria entre os terceiro e quarto maiores consumidores do setor industrial, que são os segmentos de “Fabricação de Produtos Químicos” e “Fabricação de Produtos de Minerais Não-Metálicos”, respectivamente.

Entende-se que a matriz energética das empresas de abastecimento de água é majoritariamente associada ao consumo de eletricidade, sobretudo para acionamento de conjunto motor-bomba.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 70 foi realizada a partir da estimativa quantitativa do consumo de eletricidade no segmento de abastecimento de água em relação ao consumo de eletricidade somente do setor de serviço público e do somatório do setor de serviço público com o setor industrial como um todo. Para o primeiro caso, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 8%, médio entre 8% e 20% e alto maior ou igual que 20%. No segundo caso, baixo equivale a participação menor que 2%, médio entre 2% e 6% e alto maior ou igual a 6%.

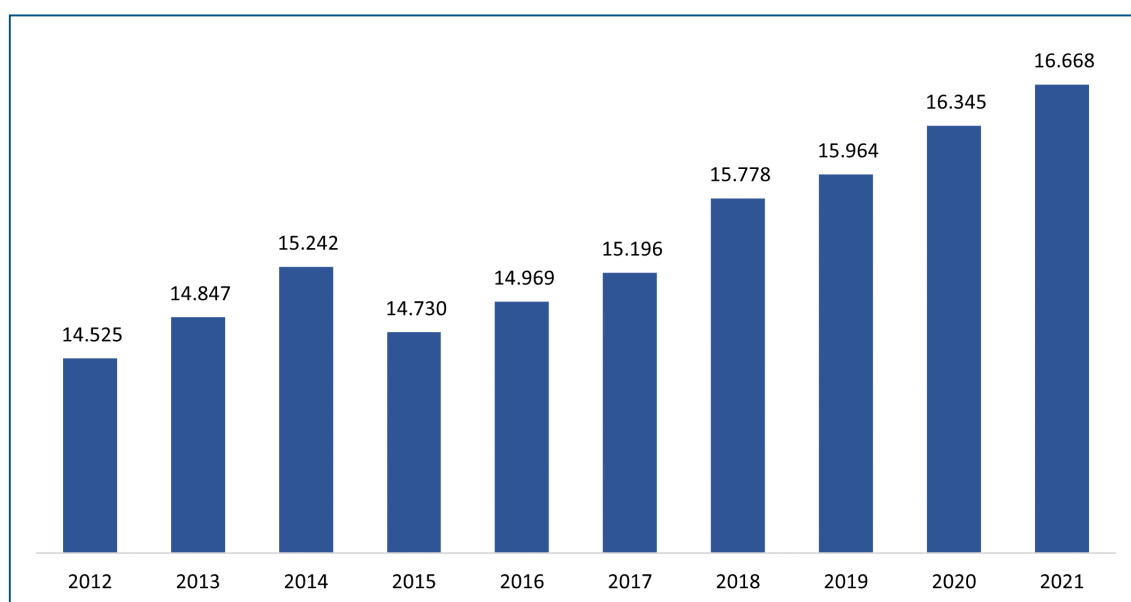


Figura 35 – Histórico do consumo de eletricidade no setor de serviço público, em GWh [71].

Tabela 70 – Avaliação da relevância da produção de aço bruto (Elaboração própria com dados de [70][71]).

Subsegmento ou rota tecnológica	Relevância em relação ao consumo do setor do serviço público (%)
Abastecimento de água	Alto
Relevância do consumo do segmento de abastecimento de água em relação ao setor do serviço público e industrial	Alto

4.8.4.2 Uso da energia elétrica no processo produtivo

Conforme divulgado pelo SNIS, em 2020, o índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água foi de 0,73 kWh/m³. Como explanado anteriormente a eletricidade é o insumo energético mais utilizado nesse setor.

A Tabela 71 apresenta as principais etapas contidas no processo de abastecimento de água, em que os processos compreendem, majoritariamente, o bombeamento da água. Verifica-se que a fase de bombeamento da água tratada para distribuição é a mais relevante em termos de consumo eletricidade, seguido pelas etapas contidas no tratamento de água e a captação da água bruta, que receberam como avaliação o nível médio. O bombeamento da água dentro da planta, que não se enquadra em nenhum dos outros processos, é a etapa classificada com menor relevância para o consumo de eletricidade.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 71 foi realizada a partir da estimativa quantitativa da distribuição percentual do consumo específico de eletricidade por etapa do processo produtivo para cada rota tecnológica. Nesse sentido, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 10%, médio entre 10% e 40% e alto maior ou igual que 40%.

Portanto, os principais equipamentos consumidores de energia elétrica no setor de abastecimento de água são os motores elétricos empregados em sistemas de bombeamento. Assim, o uso da força motriz é o principal tipo de uso final no que tange a demanda por eletricidade.

Tabela 71 – Relevância do consumo de eletricidade nas empresas de abastecimento de água, por etapa do processo produtivo (Elaboração própria a partir de [72]).

Etapa do processo	Abastecimento de água
Bombeamento de água bruta (captação)	Médio
Bombeamento de água dentro da planta	Baixo
Tratamento de água	Médio
Bombeamento de água tratada (distribuição)	Alto

(Referências Gerais: [73])

4.9 Indústria de data center

4.9.1 Visão geral

As instalações chamadas de Data Center são sistemas projetados com base em uma rede de computação, com o intuito de armazenar e gerir dados computacionais críticos, além de transferência de informações e aplicativos. Dentro de seus principais elementos de funcionamento estão: roteadores, firewalls, sistemas de armazenamento, switches, servidores e controladores de entrega de aplicativos. Os tipos de Data Center que se destacam dentro do setor são: centro de dados corporativo, data center de serviços gerenciados, data center de co-locação e centro de dados em nuvem. Esse serviço é cada vez mais empregado por empresas de diversos segmentos. Na Figura 36 apresenta-se uma visão geral dos integrantes do setor de data center, observa-se que ele constituído pelo segmento de TI, elétrica, mecânica e os vários tipos de usuários finais [74].

A Figura 37 apresenta as informações referentes à distribuição do segmento de data center no contexto mundial. Verifica-se que 69% dos data centers estão vinculados aos setores de múltiplos clientes/co-locação, telecomunicação, financeiro e softwares/serviços de nuvem. Já a parcela restante está fracionada entre os setores governamental, energia, indústria de transformação, saúde/farmácia, atacado e varejo, educação, transporte, mídia e seguros [75].

A necessidade de gerir os dados digitais e da computação em nuvem vem aumentando exponencialmente devido, principalmente, ao avanço da tecnologia e competitividade, a recente cultura do trabalho de casa vivenciado na pandemia da COVID-19 e as regulamentações governamentais de proteção de dados (LGPD). De acordo com o Cloudscene, no Brasil, já existem cerca de 120 data centers com tendência de crescimento do mercado/fornecimento desses serviços [74].

Dentro desse número de data centers, 65 são data centers de co-locação e estão distribuídos em 21 áreas do país. Os principais destaques de hubs de fornecimento dessa indústria são Paulo e Rio de Janeiro e, em 2020, a expectativa de crescimento desse mercado de data center multilocatários era de 15% e 8% nos respectivos estados da federação [74].

Apesar dos números apresentados na discussão acima, o Brasil representa apenas 2% da participação mundial do setor de data center, enquanto os Estados Unidos lideram com participação de 33%. O gráfico da Figura 38 ilustra as participações dos principais países presentes nesse mercado.

Infraestrutura de TI	Servidor
	Armazenamento
	Rede
Infraestrutura Elétrica	Sistema de alimentação ininterrupta
	Geradores
	Inversores de rede e dispositivo de manobra
	Rack PDU
	Outras infraestruturas elétricas
Infraestrutura Mecânica	Sistemas de refrigeração
	Rack
	Outras infraestruturas mecânicas
Tipo	Centro de dados corporativos
	Data center de serviços gerenciados
	Data center de co-locação
	Centro de dados em nuvem
Indústria de Consumo Final	BFSI
	Telecom e TI
	Governo
	Saúde
	Outras indústrias de consumo final

Figura 36 – Integrantes do setor de data centers [74].

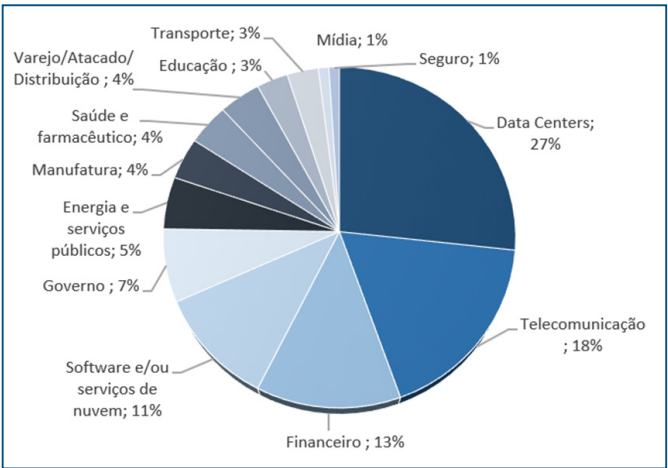


Figura 37 – Distribuição do segmento de data centers por setores [75].

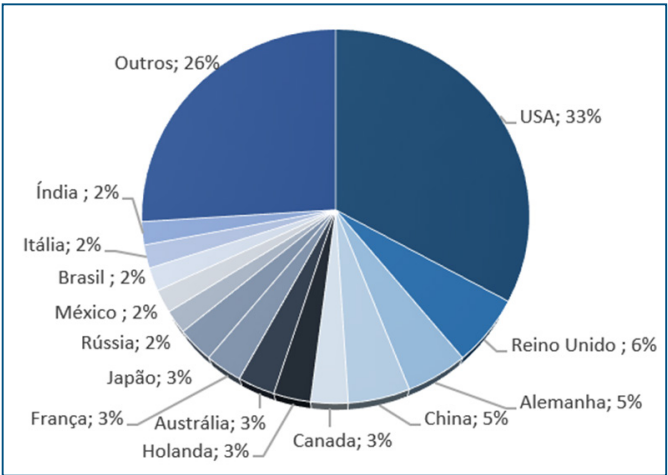


Figura 38 – Distribuição mundial do setor de data center [76].

4.9.2 Principais empresas do setor

Sobre o ponto de vista empresarial do setor de data center, há grandes empresas como a CenturyLink expandindo capacidade no Rio de Janeiro, a empresa Chinesa Huawei mostrando planos de expansão no Brasil, almejando expandir seu potencial no setor. No estado de São Paulo, a provedora de data center de co-locação Ascenty iniciou operações no seu terceiro centro de dados com valor de R\$150 milhões e 4 MW de capacidade instalada em 2020. Outro data center da empresa tem valor de US\$ 73 milhões, infraestrutura de 12.000 m² e capacidade de energia de 20 MVA [74][77].

A empresa Equinix, que oferece também serviços de co-locação no país, disponibiliza cerca de 17.695 m² de espaço para o serviço em questão e possui mais de 1.500 empresas posicionadas em seus data centers, principalmente do setor de serviços financeiros. Outros importantes players dessa competitiva indústria são: Dell Technologies, IBM Corporation, Inc, Cisco Systems e Arista Networks, entre outros [74][77]. Na Tabela 72 é possível observar a gama de empresas desse setor.

Alguns dados de ordem de grandeza de data centers pertencentes a algumas empresas anteriormente são relevantes para o entendimento da dimensão destes. O data center da empresa que presta o serviço de co-locação ODATA [78], por exemplo, possui 40 MW de potência instalada em TI, sendo o maior data center da América Latina. A empresa, que fica em São Paulo, possui 63 mil m² e uma subestação própria de 50 MW.

Outra empresa considerada relevante é a que presta serviço de co-locação localizada em Fortaleza, CE, a Ascenty [79]. Com 10 MW de potência instalada total e pouco mais de 9 mil m², possui tanque de diesel com autonomia de 48 horas. Além disso, o data center da empresa VIVO [80], que atua no setor telecomunicações no Brasil, também deve ter sua relevância reconhecida. Com uma subestação própria de 30MW, também possui reservatório de diesel, capaz de suportar o data center em sua mais alta capacidade por até 32 horas.

Tabela 72 – Lista de empresas destaques do setor de data center no Brasil (Elaboração própria com dados de [74]e [77]).

Empresa
ITAÚ
SANTANDER
VIVO
ASCENTY
TIVIT
ALOG
LEVEL 3
LOCAWEB
IBM
ALGAR
EMBRATEL
OI
UOL DIVEO
GETNET
BM&F BOVESPA
PETROBRAS
T-SYSTEM
ARISTA
CISCO
DELL TECHNOLOGIES
HEWLETT PACKARD ENTERPRISE DEVELOPMENT LP
EQUINIX
ANGOLA CABLES
HUAWAI TECHNOLOGIES CO.
LENOVO GROUP
NETAPP
PURE STORAGE
ARUP
ETIX EVERYWHERE
ABB
DIGITAL COLONY MANAGEMENT LLC
BROADCOM
HPE
JUNIPER NETWORKS
ORACLE

4.9.4 Uso da energia elétrica

4.9.4.1 Aspectos gerais

Analisando-se o contexto global, o consumo de energia elétrica dos data centers em 2020 representou 1% do consumo mundial, o equivalente a 200-250 TWh, excluindo a atividade de mineração de criptoativos [83].

Conforme discutido na introdução sobre o segmento, o setor de telecomunicações contempla grande parte do market share dessas empresas. Na Figura 40 apresenta-se o histórico do consumo de eletricidade do setor de telecomunicações no Brasil, em GWh, com o intuito de ilustrar a representatividade do consumo de eletricidade dos data centers.

Verifica-se que, em 2021, o consumo registrado foi 3.591 GWh. Comparando esse dado com o consumo do setor industrial apresentado para os segmentos da indústria, objeto de estudo desse relatório, afere-se que o consumo do setor de telecomunicações se enquadraria entre o consumo dos setores de extração de minerais não-metálicos e o de fabricação de máquinas e equipamentos.

Entende-se que existe um grande nível de complexidade em estimar o consumo do setor de data center separadamente, uma vez que ele se encontra mesclado com o consumo de energia de outras atividades realizadas pelos segmentos que possuem os data centers, como por exemplo indústrias, serviços financeiros, serviços de saúde, governamentais etc.

A partir do resumo dos espaços e subsistemas que compõem o data center, representado na Figura 40, é possível aferir que os principais consumidores de energia são equipamentos elétricos, logo, a matriz energética desse segmento é dominada pela eletricidade. No tópico subsequente é detalhada a forma de utilização da energia elétrica.

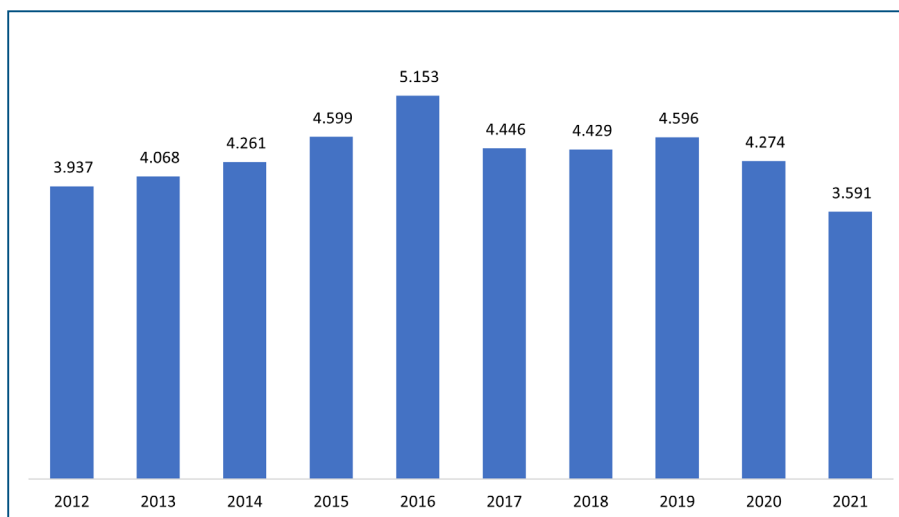


Figura 40 – Histórico do consumo de eletricidade do setor de telecomunicações no Brasil, em GWh (Elaboração própria com dados de [84]).

4.9.4.2 Uso da energia elétrica no processo produtivo

Na Tabela 74, apresenta-se a relevância do consumo de eletricidade para as principais etapas do processo. A etapa de climatização é a mais relevante em termos de consumo de eletricidade, uma vez que os data centers são bastante dependentes dos sistemas de condicionamento do ar para manter os equipamentos de TI, operando dentro das condições corretas para minimizar a ocorrência de falhas. As cargas críticas de TI, responsáveis pelo negócio das empresas do segmento, junto com os nobreaks, possuem relevância média em termos de consumo de eletricidade.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 74 foi realizada a partir da estimação quantitativa da distribuição percentual do consumo específico de eletricidade por etapa do processo. Nesse sentido, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 10%, médio entre 10% e 40% e alto maior ou igual que 40%.

Logo, compreende-se que os principais equipamentos consumidores de eletricidade são os que compõem o sistema de condicionamento de ar, os equipamentos de TI propriamente ditos e as UPS.

Tabela 74 – Relevância do consumo de eletricidade para o segmento de data centers, por etapa do processo (Elaboração própria com dados de [81]).

Etapa do processo	Data center
Climatização	Alto
Carga Crítica	Médio
UPS (Uninterruptible Power Supply)/Nobreak	Médio
Outros	Baixo
Iluminação	Baixo

A Tabela 75 apresenta a avaliação qualitativa da relevância dos tipos de uso final da energia elétrica. Destaca-se que, como esperado, o tipo de uso refrigeração possui alta relevância devido à climatização. O tipo de uso nomeado “outros” também apresenta alta relevância, uma vez que estão contempladas as cargas críticas de TI e os sistemas de nobreak.

A avaliação qualitativa apresentada na Tabela 75 foi realizada a partir da estimação quantitativa da distribuição percentual do consumo específico de eletricidade por tipo de uso final de energia elétrica para cada rota tecnológica. Nesse sentido, o índice baixo indica uma estimativa de participação menor que 10%, médio entre 10% e 40% e alto maior ou igual que 40%.

Tabela 75 – Avaliação de destinação da energia elétrica por uso final, para diferentes as rotas tecnológicas (Adaptado de [76]).

Tipo de uso final	Data Centers
Iluminação	Baixo
Outros	Alto
Refrigeração	Alto

5. Conclusões

Este relatório apresenta uma proposta de desenho para produtos de resposta da demanda adequados para o mercado brasileiro, levando em conta suas características particulares. Para construir essa recomendação de desenho, foi proposta uma metodologia de classificação para caracterizar a variedade de produtos deste tipo (como apresentado no capítulo 2).

Destaca-se que, entre as “dimensões” identificadas que caracterizam o programa de resposta da demanda, há uma dicotomia entre escolhas que levam a mais flexibilidade para o operador, ou mais flexibilidade para o agente consumidor que oferta a resposta da demanda.

Intuitivamente, oferecer mais garantias aos agentes ofertantes pode tornar o produto RD mais atraente para estes, mas também dá menos flexibilidade ao operador no que diz respeito ao acionamento do produto (e no que diz respeito ao grau de segurança de que pode lançar mão deste recurso para solucionar desequilíbrios físicos do sistema). Consequentemente, os produtos de resposta da demanda mais adequados devem levar em conta o equilíbrio entre essas duas características, analisadas do ponto de vista do contexto brasileiro atual:

- Eles devem ser aceitáveis do ponto de vista da indústria brasileira, de modo que o programa leve de fato à adesão voluntária de agentes consumidores e tenha resultados positivos. A necessidade de endereçar esta preocupação justifica a análise feita sobre as características fundamentais dos setores de interesse, apresentado no capítulo 4 do presente relatório.
- Eles também devem ser úteis e relevantes do ponto de vista do operador do sistema – ou seja, eles devem refletir uma necessidade real do sistema que possa resultar em um benefício (redução de custos, aumento da segurança de suprimento, ou critério similar) a cada vez que a resposta da demanda é despachada pelo operador. Estas necessidades foram levadas em conta na construção dos produtos apresentada no capítulo 3.

Por consequência dessa exploração do espaço de possibilidades e análise de *tradeoffs*, os consultores convergiram na representação de dois principais tipos de “contrato” para o acionamento de produtos de resposta da demanda: um contrato com características mais voltadas ao *atendimento à ponta* (em que o operador pode exigir que o consumidor reduza a sua demanda por algumas horas a cada dia) e um contrato com características mais voltadas à *redução de demanda média* (cujo principal objetivo é preservar armazenamento nos reservatórios – de modo que pode-se oferecer mais flexibilidade aos agentes no que diz respeito a como alocar a redução de demanda ao longo das horas de determinada semana).

Esta consolidação da estrutura de produtos aplicáveis ao mercado elétrico brasileiro em dois produtos principais é um dos principais resultados do presente relatório, e será objeto de aprofundamento nos relatórios subsequentes. Em particular, o relatório 4 averiguará em mais detalhe em que medida estes produtos atendem ao primeiro objetivo listado acima (aceitabilidade para a indústria); ao passo que o relatório 1 explorará em mais detalhe se esses produtos atendem ao segundo objetivo (relevância para o operador do sistema).

Referências

- [1] [RTE 2020] Réseau de Transport d'Électricité. Participate in the NEBEF mechanism. Disponível em: <https://www.services-rte.com/en/learn-more-about-our-services/participate-nebef-mechanism>
- [2] Nota Técnica nº 045 de 19 de junho de 2019. Disponível em https://www.ccee.org.br/o/ccee/documentos/CCEE_649052
- [3] Portaria Normativa nº 22/GM/MME, de 23 de agosto de 2021. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2021/08/portaria-mme-o-ferta-reducao-demanda.pdf>
- [4] Produtos e Grade Horária da Redução Voluntária da Demanda. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20210831-ONS-divulga-produtos-e-grade-horaria-da-Redu%C3%A7%C3%A3o-Volunt%C3%A1ria-da-Demanda-RVD.aspx>
- [5] Relatório de Atendimento ao Programa de Redução Voluntária da Demanda – setembro/2021. Disponível em: https://www.ccee.org.br/documents/80415/919420/Dados%20PRT22-RVD_Set21.xlsx/c88bf4c9-5a0e-22fd-29f2-ca0486cc782f
- [6] Relatório de Atendimento ao Programa de Redução Voluntária da Demanda – outubro/2021. Disponível em: https://www.ccee.org.br/documents/80415/919420/Dados%20PRT22-RVD_Out21_1_1.xlsx/308c3379-a-757-8064-e00e-ce4d77574dbd
- [7] [EPE 2017] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2018. Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selccionados: Segmento da Cadeia Siderúrgica. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/projeto-de-assistencia-tecnica-dos-setores-de-energia-e-mineral-projeto-meta>
- [8] [BNB 2021] Banco do Nordeste do Brasil (BNB) 2021. Caderno Setorial ETENE - Indústria Siderúrgica. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bits-tream/123456789/936/1/2021_CDS_173.pdf
- [9] [BNB 2018a] Banco do Nordeste do Brasil (BNB) 2018. Caderno Setorial ETENE - Indústria Siderúrgica: Investir Em Eficiência. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bits-tream/123456789/1026/1/2018_CDS_39.pdf
- [10] [Instituto Aço Brasil 2022a] Instituto Aço Brasil 2022. A Siderurgia em Números 2022. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2022/05/AcoBr_sil_Mini_anuario_2022.pdf
- [11] [Instituto Aço Brasil 2020] Instituto Aço Brasil 2020. Relatório de Sustentabilidade 2020. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/assets/pdf/PDF-2020-Relatorio-Aco-Brasil-COMPLETO.pdf>
- [12] [Instituto Aço Brasil 2022b] Instituto Aço Brasil 2022. Processo Siderúrgico. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/processo-siderurgico/>
- [13] [Instituto Aço Brasil 2017] Instituto Aço Brasil 2017. A indústria do Aço no Brasil. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/04/a2/04a2a7ac-4a9f-4505-84a5-f4c54242ead7/aco_brasil.pdf
- [14] [Instituto Aço Brasil 2022c] Instituto Aço Brasil 2022. Estatísticas da Siderurgia Steel Statistics. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2022/06/Estatistica-da-Siderurgia_1o_TRI_2022.pdf
- [15] [EPE 2022] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2022. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022: Ano Base 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>
- [16] [BNDES 2015] Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) 2015. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4287/2/BS%2041%20Sustentabilidade%20da%20siderurgia%20brasileira_.pdf

- [17] [Revista Alumínio 2020] Revista Alumínio 2020. Dia da indústria: veja como funciona a cadeia produtiva do alumínio. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/dia-da-industria-veja-como-funciona-a-cadeia-produtiva-do-aluminio/>
- [18] [EPE 2017] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2018. Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selcionados: Segmento Alumínio. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/projeto-de-assistencia-tecnica-dos-setores-de-energia-e-mineral-projeto-meta>
- [19] [Revista Alumínio 2019] Revista Alumínio 2019. Indústria do alumínio pode ser beneficiada com o Novo Mercado do Gás. <https://revistaaluminio.com.br/industria-do-aluminio-pode-ser-beneficiada-com-o-novo-mercado-do-gas/>. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/dia-da-industria-veja-como-funciona-a-cadeia-produtiva-do-aluminio/>
- [20] [ABAL 2021] Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) 2021. Anuário Estatístico Alumínio 2020. Disponível em: <https://abal.org.br/noticia/chegou-o-anuario-estatistico-2020-baixe-agora/>
- [21] [ABAL 2019] Associação Brasileira do Alumínio (ABAL). Relação entre Sucata Recuperada e Consumo Doméstico – 2019. Estatísticas: Nacionais: Reciclagem. Disponível em: <https://abal.org.br/estatisticas/nacionais/reciclagem/total-aluminio-2019/>
- [22] [ABAL 2022a] Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) 2022. Cadeia Primária. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>
- [23] [Metal Thaga 2017a]. Fundação de Alumínio: Saiba Como é Feita. Disponível em: <https://metalthaga.com.br/artigos/fundacao-de-aluminio-saiba-como-e-feita/>
- [24] [Metal Thaga 2017b]. Como Funciona o Processo de Laminação do Alumínio?. Disponível em: <https://metalthaga.com.br/artigos/como-funciona-o-processo-de-laminacao-de-aluminio/>
- [25] [ABAL 2022b] Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) 2022. Alumínio: Processos de Produção - Forjamento. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/forjamento/>
- [26] [ABAL 2022b] Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) 2022. Alumínio: Processos de Produção - Extrusão. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/extrusao/>
- [27] [ABAL 2022c] Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) 2022. Alumínio: Processos de Produção - Usinagem. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/usinagem/>
- [28] [ABAL 2022d] Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) 2022. Alumínio: Processos de Produção - Soldagem. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/soldagem/>
- [29] [ABAL 2022e] Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) 2022. Alumínio: Processos de Produção - Estampagem. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/estampagem/>
- [30] [ABAL 2022f] Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) 2022. Alumínio: Processos de Produção - Acabamentos. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/acabamentos/>
- [31] [ABAL 2017] Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) 2017. Alumínio Brasileiro Soluções para uma Vida Sustentável 2017. Disponível em: <http://abal.org.br/downloads/publicacoes/aluminio-brasileiro-solucoes-para-uma-vida-sustentavel-port.pdf>
- [32] [CNI 2017] Confederação Nacional da Indústria (CNI) 2017. Indústria Brasileira de Cimento: Base para a Construção do Desenvolvimento. Disponível: https://static.portal-daindustria.com.br/media/filer_public/d2/4b/d24b904d-c672-43f5-a0b7-9644ad97091a/abcp.pdf
- [33] [MME 2021] Ministério de Minas e Energia (MME). Anuário Estatístico 2021: Setor de Transformação de Não Metálicos. Disponível: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatistico-2021-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos-ano-base-2020.pdf/view>
- [34] [Cimento.org 2017] Cimento.org 2017. Cimento no Brasil. Disponível em: <https://cimento.org/cimento-no-brasil/>

- [35] [SNIC 2022] Sindicato Nacional da Indústria do Cimento 2022. Processo Produtivo. Disponível em: <http://snic.org.br/processo-de-producao.php>
- [36] [SNIC 2019] Sindicato Nacional da Indústria do Cimento 2019. Road Tecnológico do Cimento. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/roadmap/roadmap-tecnologico-do-cimento-brasil.pdf>
- [37] [EPE 2022] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2022. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022: Ano Base 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>
- [38] [EPE 2020] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2020. Atlas da Eficiência Energética – Brasil | 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-556/Atlas%20consolidado_08_03_2021.pdf
- [39] Santana et al. Potencial de conservação de energia na indústria cimenteira no Brasil 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/301220354_Potencial_de_conservacao_de_energia_na_industria_cimenteira_no_Brasil
- [40] [ABICLOR 2020]. Associação Brasileira da Indústria de Álcalis, Cloro e Derivados (ABICLOR). Balanço socioeconômico da indústria de cloro-álcalis no Brasil 2020. Disponível em: http://www.abiclor.com.br/wp-content/uploads/2021/04/Abiclor_Balanco_socioeconomico_2020.pdf
- [41] [ABICLOR 2021]. Associação Brasileira da Indústria de Álcalis, Cloro e Derivados (ABICLOR). Relatório Estatístico Janeiro/Dezembro 2020. Disponível em: http://www.abiclor.com.br/wp-content/uploads/2021/04/Relatorio_Abiclor_JANEIRO_DEZEMBRO_2020.pdf
- [42] [Unipar 2022]. Unipar. Processo Produtivo. Disponível em: <https://www.unipar.com/processo-produtivo/>
- [43] [BNDES 2009] Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. O setor de soda-cloro no Brasil e no mundo. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2682/1/BS%2029_O%20setor%20de%20soda-cloro%20no%20Brasil_P.pdf
- [44] [EPE 2022] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2022. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022: Ano Base 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>
- [45] [EPE 2017] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2018. Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selcionados: Segmento Químico. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/projeto-de-assistencia-tecnica-dos-setores-de-energia-e-mineral-projeto-meta>
- [46] [Bradesco 2021] Bradesco. Papel e Celulose: Monitor Setorial – Novembro de 2021. Disponível em: https://www.economiaemdia.com.br/BradescoEconomiaEmDia/static_files/pdf/pt/monitores/setorial/infset_papel_e_celulose.pdf
- [47] [Klabin 2018] Klabin. Relatório de Sustentabilidade 2018. Disponível em: <https://rs2018.klabin.com.br/a-klabin/>
- [48] [Ibá 2021] Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). Relatório Annual Ibá 2021. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>
- [49] [CGEE 2012] Centro de Gestão de Estudos Estratégicos. Eficiência Energética: recomendações de ações de CT&I em segmentos da indústria selecionados – Celulose e Papel. Disponível em: <https://www.nipe.unicamp.br/docs/publicacoes/celulose-papel-web.pdf>
- [50] [Klabin 2021] Klabin. Relatório de Sustentabilidade 2021. Disponível em: https://klabin.com.br/documents/400373575/0/klabin_RS2021_PT.pdf/edf6a67b-26db-df4e-8967-579c51296aa6?t=1656683856887
- [51] [EPE 2017] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2018. Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selcionados: Segmento Celulose e Papel. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/projeto-de-assistencia-tecnica-dos-setores-de-energia-e-mineral-projeto-meta>
- [52] [EPE 2022] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2022. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022: Ano Base 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>

- [53] [EPE 2021] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2021. Balanço Energético Nacional 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>
- [54] [UNICAMP 2009] Instituto de Economia da UNICAMP. Instituto de Economia da UFRJ. Projeto Perspectivas Do Investimento No Brasil Bloco: Produção Sistema Produtivo: Bens Salário. Disponível em: https://www.econ.unicamp.br/neit/images/stories/arquivos/ds_benssalario_alimentos_bebidas.pdf
- [55] [ABIA 2020] Associação Brasileira da Indústria de Alimentos. Relatório Annual 2020. Disponível em: <https://www.abia.org.br/vsn/temp/z2021826RelatorioAnual2020simples-novo1.pdf>
- [56] [BNB 2021b] Banco do Nordeste do Brasil (BNB) 2021. Caderno Setorial ETENE: Indústria de Bebidas Alcolicas. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bits-tream/123456789/1184/1/2021_CDS_161.pdf
- [57] [BNB 2021a] Banco do Nordeste do Brasil (BNB) 2021. Caderno Setorial ETENE: Indústria de Alimentos. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bits-tream/123456789/916/1/2021_CDS_176.pdf
- [58] [BNB 2019] Banco do Nordeste do Brasil (BNB) 2021. Caderno Setorial ETENE: Indústria de Bebidas Não Alcolicas. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bits-tream/123456789/1186/1/2019_CDS_86.pdf
- [59] [BNB 2021b] Banco do Nordeste do Brasil (BNB) 2021. Caderno Setorial ETENE: Frango. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bits-tream/123456789/821/1/2021_CDS_167.pdf
- [60] [ABIA 2022] Associação Brasileira da Indústria de Alimentos (ABIA). Infográfico 2022. Disponível em: <https://abia.org.br/downloads/Infografico2022.pdf>
- [61] [EPE 2017] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2018. Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Seleccionados: Segmento Alimentos e Bebidas. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/projeto-de-assistencia-tecnica-dos-setores-de-energia-e-mineral-projeto-meta>
- [62] [SBPE 2018] Sociedade Brasileira de Planejamento Energético (SBPE) 2018. Perspectivas da venda de energia Elétrica excedente pelo setor sucroalcooleiro. Revista Brasileira de Energia Vol. 2 | Nº 2.
- [63] [EPE 2021] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2021. Balanço Energético Nacional 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>
- [64] [Sucroenergetico Revista Opinioes 2013] Sucroenergetico Revista Opinioes. Cogeração nas usinas de açúcar e álcool: oportunidades perdidas e uma nova janela de oportunidades. Disponível em: <https://sucroenergetico.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/19-cogerao-nas-usinas-de-acucar-e-alcool-oportun/#:~:text=Cogera%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A9%20tecnologia%20tradicional%20nas,de%20vapor%20de%20baixa%20press%C3%A3o.>
- [65] [Oliveira et al 2017] Oliveira et al. Estudo sobre cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro. REGRAD, UNIVEM/Marília-SP, v. 10, n. 1, p 354 - 365, outubro de 2017.
- [66] [SNS 2021] Secretaria Nacional de Saneamento. Panorama do Saneamento Básico no Brasil 2021. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/panorama/PANORAMA_DO_SANEAMENTO_BASICO_NO_BRASIL_SNIS_2021.pdf
- [67] [Instituto Água e Saneamento 2021]. Saneamento 2021: Balanço e perspectivas após aprovação do novo Marco Legal Lei 14.026/2020. Disponível em: <https://www.aguaesaneamento.org.br/wp-content/uploads/2021/11/Saneamento-2021-IAS.pdf>
- [68] [SNIS 2020] Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento 2020. Abastecimento de Água – 2020. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-abastecimento-agua>
- [69] [Instituto Trata Brasil 2022]. Ranking do Saneamento Instituto Trata Brasil 2022 (SNIS 2020). Disponível em: https://tratabrasil.org.br/images/estudos/Ranking_do_Saneamento_2022/Relat%C3%B3rio_do_RS_2022.pdf

- [70] [SNIS 2021] Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento 2021. Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento DEZ/2021 Visão Geral ano de referência 2020. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2021.pdf
- [71] [EPE 2022] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2022. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022: Ano Base 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>
- [72] [EPRI 2013] Electric Power Research Institute 2013 (EPRI). Electricity Use and Management in the Municipal Water Supply and Wastewater Industries. Disponível em: https://www.sciencetheearth.com/uploads/2/4/6/5/24658156/electricity_use_and_management_in_the_municipal_water_supply_and_wastewater_industries.pdf
- [73] [SNIS 2018] Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento 2018. Ações de assistência técnica em redução e controle de perdas de água e uso eficiente de energia elétrica. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/downloads/publicacoes-acertar/perdas/Vol.5-Gestao-de-Energia.pdf>
- [74] [Mordor Intelligence 2022] Mordor Intelligence. Brazil data center market - growth, trends, covid-19 impact, and forecasts (2022 - 2027). Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/brazil-data-center-market>
- [75] [Uptime Institute 2020] Uptime Institute 2020. Uptime Institute Uptime global data center survey 2020. Disponível em: https://www.missioncriticalmagazine.com/ext/resources/whitepapers/2020/2020AnnualSurvey_EndUser_v4s.pdf
- [76] [USITC 2021] United States International Trade Commission (USITC). Data Centers Around the World: A Quick Look. Disponível em: https://www.usitc.gov/publications/332/executive_briefings/ebot_data_centers_around_the_world.pdf
- [77] [Tech in Brazil 2015] Tech in Brazil. Maiores Data Centers no Brasil. Disponível em: <https://techinbrazil.com.br/maiores-data-centers-no-brasil>
- [78] [ODATA 2021] ODATA. Disponível em: <https://cyrusone.com/wp-content/uploads/2021/10/ODATA-Spec-Sheet.pdf>
- [79] [Ascenty 2022] Ascenty. Fortaleza Data Center. https://www.ascenty.com/wp-content/uploads/2022/04/Folder_Ascenty-Data-Center-Fortaleza-EN.pdf
- [80] [VIVO 2022] VIVO. Data Center Vivo Tamboré 1, 2, 3 e Prado Velho. Disponível em: <https://www.vivo.com.br/para-empresas/produtos-e-servicos/digitais/data-center/data-centers>
- [81] [Faccioni 2016] Faccioni Filho, Mauro 2016. Conceitos e infraestrutura de datacenters. Palhoça: UnisulVirtual. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319913948_Conceitos_e_infraestrutura_de_datacenters/link/59c165b9a6fdcc69b92bc1ef/download
- [82] [Uptime Institute 2022] Uptime Institute 2022. Tier Classification System. Disponível em: https://uptimeinstitute.com/tiers?utm_source=google_adwords&utm_medium=cpc&utm_campaign=search_SearchNetwork-Global_&utm_matchtype=&utm_network=g&utm_device=c&utm_keyword=&utm_placement=&utm_position=&utm_campaignname=SearchNetwork-Global&utm_groupname=&utm_creativename=&gclid=C-jwKCAjwlqOXBhBqEiWA-hhitFB9OYic88KJa-0MagXgapAI2DyAcZexd_bZMXpDTxQYluQI-fWV_MHxoCS_0QAvD_BwE
- [83] [IEA 2021] International Energy Agency 2021 (IEA). Data Centres and Data Transmission Networks. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>
- [84] [EPE 2022] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2022. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022: Ano Base 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>

