

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SEGMENTOS INDUSTRIAIS SELECIONADOS



SEGMENTO ALUMÍNIO

Pesquisa/Produto/Trabalho executado com recursos provenientes do Acordo de Empréstimo nº 8.095-BR, formalizado entre a República Federativa do Brasil e o Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento – Bird, em 1º de março de 2012.

16.11.2017-V3

Elaborado por:

Consultor Sênior: Márcio Pinto Gomes

Consultores Juniores: Mónica Blanco Olalla e Thiago Mattos de Souza

Estatístico: Teresa Aparicio Villegas

Coordenador do Projeto: Fernando Moreno Pinzón

Sumário

1. INTRODUÇÃO	6
2. PERFIL DA INDÚSTRIA BRASILEIRA DO ALUMÍNIO	7
a. Comportamento da produção em nível de subsegmento e suas tendências	7
b. Informação do consumo de energia na cadeia de alumínio e sua participação na demanda industrial.....	14
c. Indicadores que serão quantificados a partir da análise da realidade brasileira atual.	14
3. DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS PRODUTIVOS PRINCIPAIS DO SEGMENTO INDUSTRIAL	17
a. Processos de produção principais do subsegmento Bauxita	17
b. Processos de produção principais do subsegmento Alumina	18
c. Processos de produção principais do subsegmento Alumínio Primário.....	22
d. Processos de produção principais do subsegmento Alumínio Secundário	23
4. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA NO ESTUDO	26
a. Seleção da amostra da pesquisa	26
b. Seleção das etapas do processo de produção	27
c. Tratamento de dados.....	27
5. INDICADORES DE CONSUMO ENERGÉTICO POR SUBSEGMENTO	28
a. Subsegmento Bauxita	28
i. Situação atual.....	28
ii. Condições com tecnologias mais eficientes	31
b. Subsegmento Alumina	36
i. Situação atual.....	36
ii. Condições com tecnologias mais eficientes	39

c. Subsegmento Alumínio Primário.....	44
i. Situação atual.....	44
ii. Condições com tecnologias mais eficientes	47
d. Subsegmento Alumínio Secundário	51
i. Situação atual.....	51
ii. Condições com tecnologias mais eficientes	54
6. ANÁLISE DE CONDICIONANTES À PENETREÇÃO DE TECNOLOGIAS EFICIENTES DE ENERGIA POR SUBSEGMENTO	58
a. Subsegmento Bauxita	58
i. Condicionantes técnicos.....	58
ii. Condicionantes econômico-financeiros	60
iii. Outros condicionantes.....	61
b. Subsegmento Alumina	62
i. Condicionantes técnicos.....	62
ii. Condicionantes econômico-financeiros	63
iii. Outros condicionantes.....	63
c. Subsegmento Alumínio Primário.....	64
i. Condicionantes técnicos.....	64
ii. Condicionantes econômico-financeiros	64
iii. Outros condicionantes.....	65
d. Subsegmento Alumínio Secundário	66
i. Condicionantes técnicos.....	66
ii. Condicionantes econômico-financeiros	66
iii. Outros condicionantes.....	66
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	67
8. REFERÊNCIAS UTILIZADAS	69

Lista de tabelas

- Tabela 1: Ranking mundial na produção da cadeia de Alumínio
- Tabela 2: Panorama dos subsegmentos da cadeia de alumínio 2015
- Tabela 3: Principais estatísticas do segmento de alumínio em Brasil, 2014
- Tabela 4: Indicadores de rendimento energético atuais, subsegmento Bauxita
- Tabela 5: Coeficientes de destinação atuais, subsegmento Bauxita
- Tabela 6: Investimento para reposição de equipamentos com a mesma eficiência
- Tabela 7: Equivalência entre lâmpadas LED e convencionais
- Tabela 8: Indicadores de rendimento energético na situação alternativa, subsegmento de Bauxita
- Tabela 9: Coeficientes de destinação na situação com tecnologias mais eficientes, Subsegmento de Bauxita
- Tabela 10: Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência
- Tabela 11: Indicadores de rendimento energético atuais, Subsegmento Alumina
- Tabela 12: Coeficientes de destinação atuais, Subsegmento Alumina
- Tabela 13: Investimento para reposição de equipamentos com a mesma eficiência
- Tabela 14: Indicadores de rendimento energético na situação com tecnologias mais eficientes, Subsegmento Alumina
- Tabela 15: Coeficientes de destinação na situação com tecnologias mais eficientes, Subsegmento Alumina
- Tabela 16: Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência
- Tabela 17: Indicadores de rendimento energético atuais, Subsegmento Alumínio Primário
- Tabela 18: Coeficientes de destinação atuais, Subsegmento Alumínio Primário
- Tabela 19: Investimento para reposição de equipamentos com a mesma eficiência
- Tabela 20: Indicadores de rendimento energético na condição alternativa, Subsegmento Alumínio Primário
- Tabela 21: Coeficientes de destinação da situação com tecnologias mais eficientes, Subsegmento Alumínio Primário
- Tabela 22: Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência
- Tabela 23: Indicadores de rendimento energético atuais, Subsegmento Alumínio Secundário
- Tabela 24: Coeficientes de destinação atuais, Subsegmento Alumínio Secundário
- Tabela 25: Investimento para reposição de equipamentos com a mesma eficiência
- Tabela 26: Indicadores de rendimento energético na situação com tecnologias mais eficientes, Subsegmento Alumínio Secundário
- Tabela 27: Coeficientes de Destinação na situação com tecnologias mais eficientes, Subsegmento Alumínio Secundário
- Tabela 28: Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência
- Tabela 29: Rendimentos de motores elétricos de indução.
- Tabela 30: Matriz de Tecnologias Inovadoras de Uso Geral. Magnitude dos Impactos sobre o processo produtivo.

Lista de figuras

- Figura 1: Bauxita - Reservas (à esquerda) e produção mundial (à direita)
- Figura 2: Mineração de bauxita em milhões de toneladas métricas por ano
- Figura 3: Produção mundial de alumínio 2016
- Figura 4: Relação entre Sucata Recuperada e Consumo Doméstico 2015
- Figura 5: Fluxograma do processo de produção da bauxita.
- Figura 6: Esquema do processo Bayer
- Figura 7: Esquema de cuba eletrolítica
- Figura 8: Porcentagem de latas recicladas por país
- Figura 9: fluxograma de processo simplificado
- Figura 10: fluxograma do processo de produção da alumina simplificado
- Figura 11: Medidas de eficiência energética para caldeiras, sem investimento.
- Figura 12: Fluxo de processos de produção do alumínio primário
- Figura 13: Fluxograma de processo de produção de alumínio secundário simplificado
- Figura 14: Recuperação do calor a partir do gás da chaminé para pré-aquecer o gás da combustão
- Figura 15: Oportunidades de eficiência energética para a indústria

Lista de gráficos

- Gráfico 1: Reservas de bauxita em milhões de toneladas
- Gráfico 2: Produção de alumina em milhões de toneladas

1. INTRODUÇÃO

Descrição geral do objetivo do relatório

O presente relatório tem como objetivo identificar e avaliar a eficiência energética nas indústrias da cadeia de produção do alumínio, assim como a geração de dados básicos relativos ao uso de energia (elétrica e térmica) através da realização de pesquisa em âmbito nacional.

O estudo, inicialmente, caracteriza este segmento sob os pontos de vista técnico, econômico, energético e ambiental e, em seguida, é mostrada a metodologia utilizada para o cálculo dos potenciais de conservação de energia e comparados os resultados com os encontrados na literatura técnica. São comentadas, por fim, algumas barreiras existentes para as ações de conservação de energia na indústria da cadeia de produção do alumínio.

Abrangência deste relatório

O alcance deste estudo no segmento de Alumínio está definido para os seguintes subsegmentos: Bauxita, Alumina, Alumínio Primário e Alumínio Secundário.

O estudo aborda os seguintes temas específicos:

- Descrição do processo produtivo de cada subsegmento;
- Consumo de energia na cadeia do alumínio e sua participação na demanda industrial;
- Consumo de energia de cada subsegmento e sua distribuição fonte-uso;
- Indicadores de consumo energético em cada subsegmento nas condições da situação atual de produção;
- Indicadores de consumo energético em cada subsegmento considerando a utilização de tecnologias mais eficientes;
- Análises dos condicionantes de penetração de tecnologias eficientes de energia por subsegmento;
- Conclusões gerais do estudo.

2. PERFIL DA INDÚSTRIA BRASILEIRA DO ALUMÍNIO

a. Comportamento da produção em nível de subsegmento e suas tendências.

Em 2016, o Brasil foi o terceiro produtor de bauxita, atrás da Austrália e China; o terceiro produtor de alumina, atrás de China e Austrália, e o décimo primeiro produtor de alumínio primário, precedido pela China, Rússia, Canadá, Emirados Árabes, Índia, Austrália, Estados Unidos, Noruega, Bahrein e Arábia Saudita.

Produção de		
Bauxita	Alumina	Alumínio primário
Austrália	China	China
China	Austrália	Rússia
Brasil	Brasil	Canadá
Malásia	Índia	Emiratos Árabes
Índia	Estados Unidos	Índia
Guiné	Rússia	Austrália
Jamaica	Jamaica	Estados Unidos
Rússia	Cazaquistão	Noruega
Cazaquistão	Suriname	Bahrein
Suriname	Grécia	Arábia Saudita
Grécia	Venezuela	Brasil

Fonte: Elaboração própria com dados de Mineral Commodity Summaries-2016

Tabela 1: Ranking mundial na produção da cadeia de Alumínio

Em relação ao comércio externo brasileiro, em 2015 registrou-se queda de 13,7% no volume de importações e aumento (em volume) de 8,3% das exportações de alumínio e seus produtos em relação ao ano 2014. Na etapa de mineração, em 2015 as exportações de bauxita e alumina (em volume), cresceram respectivamente 11,8 % e 3,5% em relação ao ano anterior. (ABAL-Estatísticas)

A Tabela 2 apresenta um panorama da produção e consumo doméstico de bauxita, alumina e alumínio primário no Brasil e mostra algumas consequências da queda da produção de alumínio primário no país, como o aumento de exportações de bauxita e alumina, passando o país a importar alumínio primário.

	Produção total 2015 (1000t)	% consumo doméstico	Observações
Bauxita	37.057	66%	O volume cresceu 2,1% e as exportações cresceram 11,8% em relação a 2014. Os principais destinos da bauxita exportada foram Estados Unidos, Canadá e China.
Alumina	10.452	19%	A produção foi equivalente a 2014. O consumo doméstico recuou 14,7% em relação a 2014. As exportações cresceram 3,5%. Os principais destinos da alumina brasileira foram Canadá, Noruega e Emirados Árabes.
Alumínio Primário	772	61%	O volume produzido foi 19,7% menor que 2014 devido ao encerramento de atividades de plantas, causada por aumentos dos custos de produção, principalmente os de energia elétrica.

Fonte: Bauxita no Brasil Mineração Responsável e Competitividade-ABAL,2015.

Tabela 2: Panorama dos subsegmentos da cadeia de alumínio 2015.

Discriminação		Unidades	2012	2013	2014
Produção	Total Bauxita ⁽¹⁾		34.988	33.849	35.410
	Bauxita metalúrgica	(10 ³ t)	34.374	33.552	34.610
	Bauxita não metalúrgica □		614	297	800
	Alumina	(10 ³ t)	10.320	9.942	10.439
	Metal primário	(10 ³ t)	1.436	1.304	962
	Metal reciclado	(10 ³ t)	508	510	540
Importação	Bauxita	(10 ³ t)	110,3	0	0
	Bauxita	(106 US\$-FOB)	4,3	0	0
	Alumina	(10 ³ t)	42	15	18
	Alumina	(106 US\$-FOB)	21	12	13
Exportação	Metal primário, sucatas, semiacabados e outros	(10 ³ t)	341	333	636,9
	Metal primário, sucatas, semiacabados e outros	(106 US\$-FOB)	1.317	1.315	1.977
	Bauxita	(10 ³ t)	6.861	8.423	8.353
	Bauxita	(106 US\$-FOB)	216,8	243,7	227,6
Consumo aparente ⁽²⁾	Alumina	(10 ³ t)	7.274	7.103	8.182
	Alumina	(106 US\$-FOB)	1.915	1.809	2.334
	Metal primário, sucatas, semiacabados e outros	(10 ³ t)	632	530	456,9
	Metal primário, sucatas, semiacabados e outros	(106 US\$-FOB)	1.484	1.425	1.355
Preços médios	Bauxita □	(10 ³ t)	28.243	25.434	27.062
	Alumina	(10 ³ t)	3.096	2.865	2.288,50
	Metal primário, sucatas, semiacabados e outros	(10 ³ t)	1.653	1.617	1.682
Preços médios	Bauxita ⁽³⁾	(US\$/t)	32,58	29,66	27,57
	Alumina ⁽⁴⁾	(US\$/t)	263,28	254,71	285,26
	Metal ⁽⁵⁾	(US\$/t)	1.986,51	1.964,28	1.898,06

Fonte: DNPM/DIPLAM; Associação Brasileira do Alumínio (ABAL); MDIC. (1) produção de bauxita - base seca; (2) produção (primário + secundário) +importação - exportação; (3) preço médio FOB das exportações de bauxita não calcinada (minério de alumínio); (4) preço médio FOB das exportações de alumina calcinada; (5) preço médio FOB das exportações de alumínio não ligado em forma bruta (lingote).

Tabela 3: Principais estatísticas do segmento de alumínio no Brasil, 2014.

No que se refere à destinação do alumínio no mercado interno brasileiro, sobressai o consumo para embalagens e veículos de transporte, em um primeiro patamar de importância (destinação da produção acima de 20%) e, para a indústria de eletricidade e construção civil (destinação da produção entre 10 e 20%).

É interessante observar que a lógica mundial de alocação da indústria do alumínio, de um modo geral, visa a produção de alumina junto às reservas do minério (bauxita), a produção do alumínio primário situada onde haja disponibilidade de energia elétrica a preços competitivos, e a produção de transformados e de produtos finais é, preferencialmente, localizada junto aos mercados consumidores.

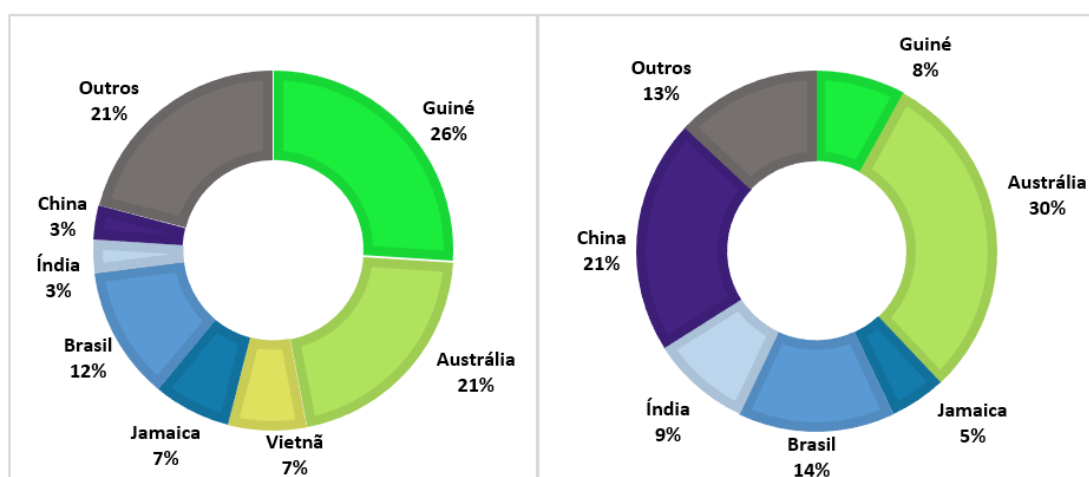
Produção de bauxita

A bauxita ocupa a terceira posição de recursos naturais em volume produzido no Brasil, com cerca de 37 milhões de toneladas anuais, atrás dos agregados para construção civil (areia, brita, cascalho e cimento), com cerca de 772 milhões, e do minério de ferro, com 411 milhões de toneladas anuais (DNPM, Sumário Mineral – edição 2015).

No panorama mundial, o Brasil se situa entre os países com maiores reservas e maior produção de bauxita, ocupando a terceira posição no ranking mundial de reservas, depois de Guiné e da Austrália, e o terceiro lugar também depois da Austrália e da China no referente à produção.

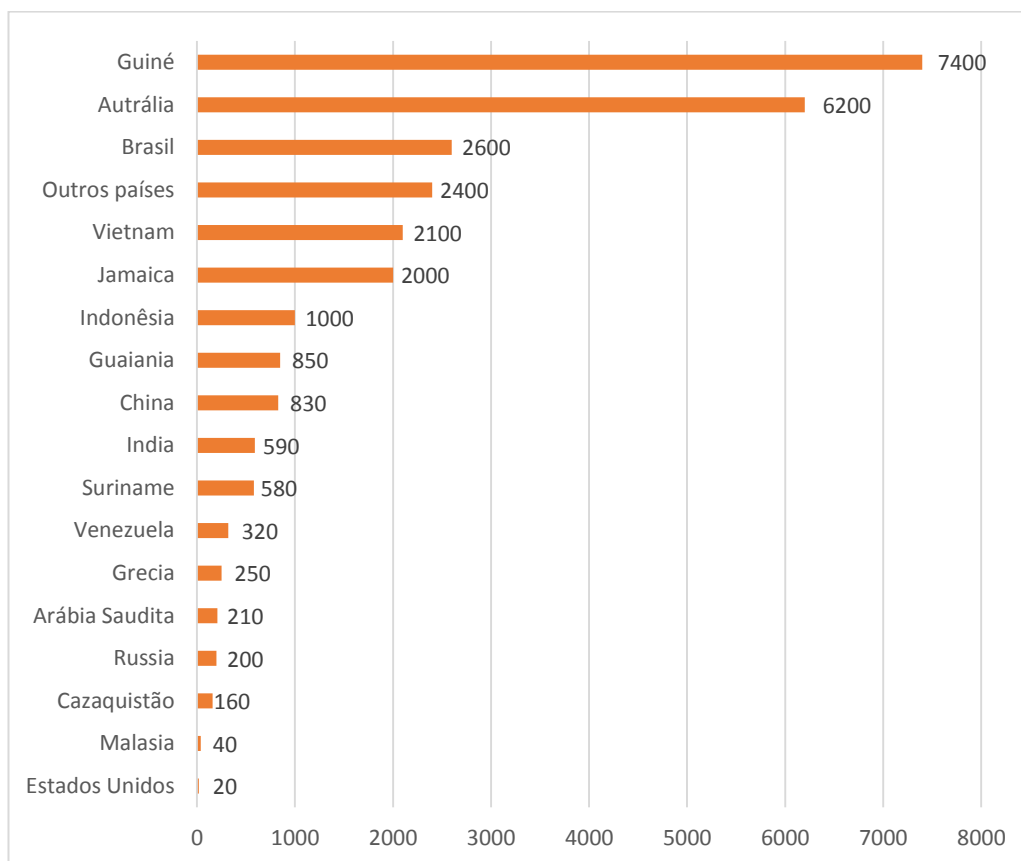
As reservas de bauxita que se tem conhecimento correspondem, aproximadamente, a 28 bilhões de toneladas métricas. No ritmo da extração atual, essas reservas ainda durariam por mais de 100 anos.

Se incluirmos, porém, os recursos de bauxita ainda por serem descobertos, a estimativa total seria de 50 a 75 bilhões de toneladas métricas. Tal estimativa prolongaria a vida das reservas de 250 a 340 anos.



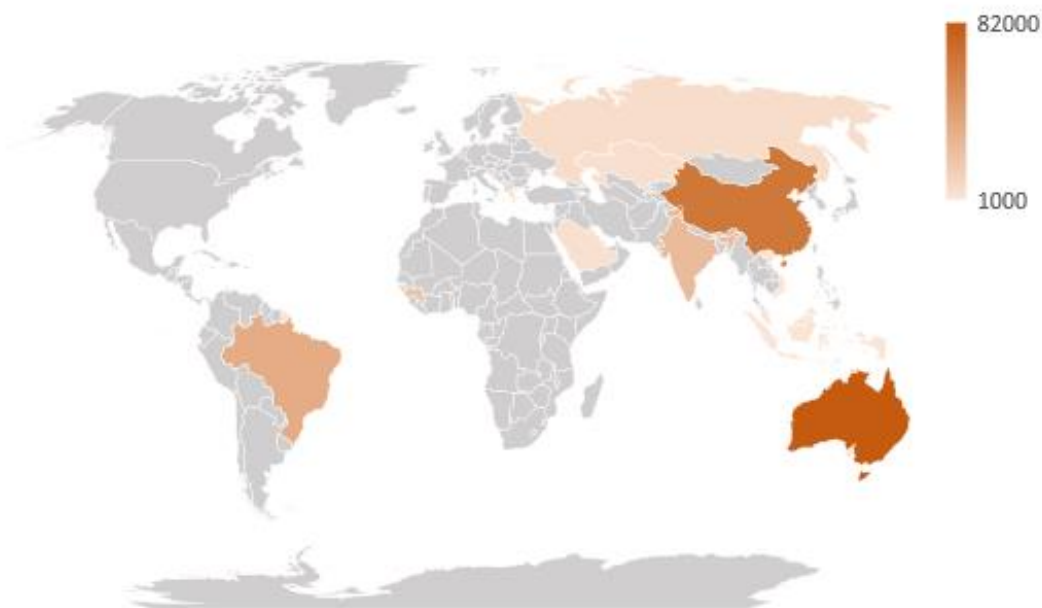
Fonte: Hydro no Brasil, 2016.

Figura 1: Bauxita - Reservas (à esquerda) e produção mundial (à direita) ano 2016.



Fonte: Elaboração própria com dados de Mineral Commodity Summaries–2016

Gráfico 1: Reservas de bauxita em milhões de toneladas



Fonte: Elaboração própria com dados de Mineral Commodity Summaries–2016

Figura 2: Mineração de bauxita em milhares de toneladas métricas por ano.

Em 2015, a produção nacional de bauxita atingiu 37 milhões de toneladas, contra os 36,3 milhões de toneladas do ano anterior. Entretanto, a estagnação do preço, o custo crescente e a inflação alta, levaram a nova crise, com lucros decrescentes ou agravamento dos prejuízos. A desvalorização cambial não foi suficiente para reverter a situação.

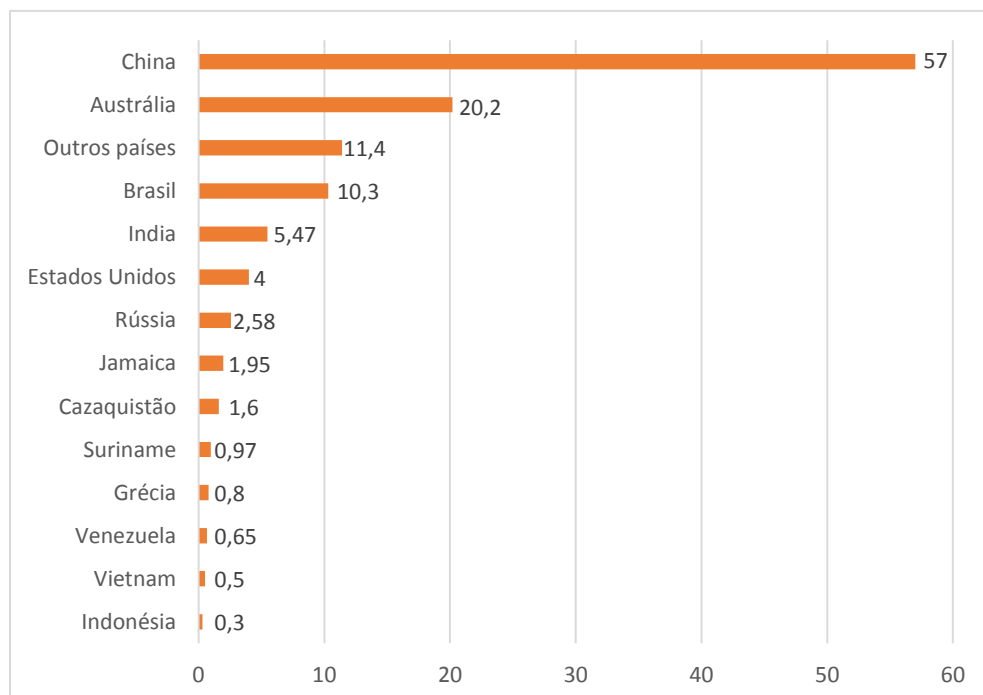
O Pará produziu 33,2 Mt de bauxita, cerca de 90,9% do total nacional, com a MRN liderando com 18 Mt, a NorskHydro com 10 Mt e a Alcoa com 5 Mt, segundo os dados da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL).

Produção de alumina

Atualmente, cerca de 80% da alumina produzida no Brasil é destinada à exportação, portanto, a posição do país como importador de alumínio, que teve início em 2015, permitiu que houvesse esse direcionamento de alumina para o exterior.

As principais empresas produtoras de alumina estão no Pará e no Maranhão com os projetos da Alunorte, com capacidade de 6,3 milhões de toneladas de alumina por ano, e da Alumar. Minas Gerais, apesar de possuir 30% das reservas brasileiras de bauxita, tem apenas 14% da produção nacional e menos de 3% da produção de alumina, já que a produção de bauxita do grupo CBA, no estado de Minas Gerais, é transferida para São Paulo, para a fabricação de alumina e alumínio. (SINDIEXTRA, 2012)

No panorama mundial, o Brasil se situa entre os países com maior produção de alumina, depois de China e da Austrália.

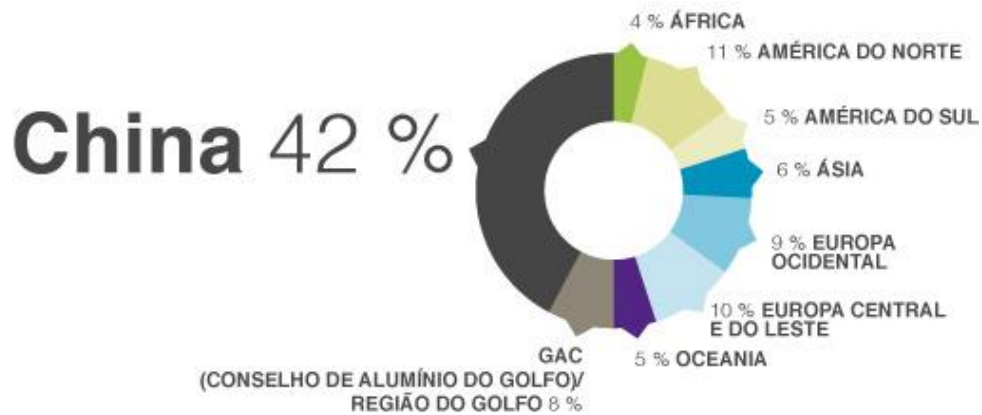


Fonte: Elaboração própria com dados de Mineral Commodity Summaries–2016

Gráfico 2: Produção de alumina em milhões de toneladas.

Produção de alumínio primário

No panorama mundial, a China é, sem dúvida, o maior produtor mundial de alumínio e também o país que apresenta o maior índice de crescimento.



Fonte: Hydro no Brasil, 2016

Figura 3: Produção mundial de alumínio 2016

A cadeia produtiva do alumínio no Brasil passa por momentos difíceis. Da mineração da bauxita ao segmento de produtos acabados, cada elo enfrenta desafios provocados pela recessão, pela alta do preço da energia ou pelo excesso de oferta no mercado internacional. O segmento mais afetado no país é o de alumínio primário, que ano a ano vem acumulando quedas de produção. No primeiro semestre de 2015, a produção teve queda de 25,1% na comparação com o mesmo período de 2014. Em 2014, a baixa anual foi de 26,2%. O fechamento da usina da Alumar, em março de 2015, é um símbolo da crise do setor. Inaugurada em 1984, a empresa controlada pela Alcoa era um dos maiores complexos de produção de alumina e alumínio primário do mundo. Com o fechamento da unidade, a Alcoa encerrou a produção de alumínio primário no país.

Dado o alto nível de incertezas relacionadas à recuperação econômica do Brasil, a Abal espera que a produção se mantenha estável em 2017, após aumentar para 800 mil toneladas em 2016. No ano anterior, apenas a produção de Albrás e CBA gerou 737,4 mil toneladas de alumínio primário de um total de 772,2 mil toneladas de alumínio primário produzidas no Brasil.

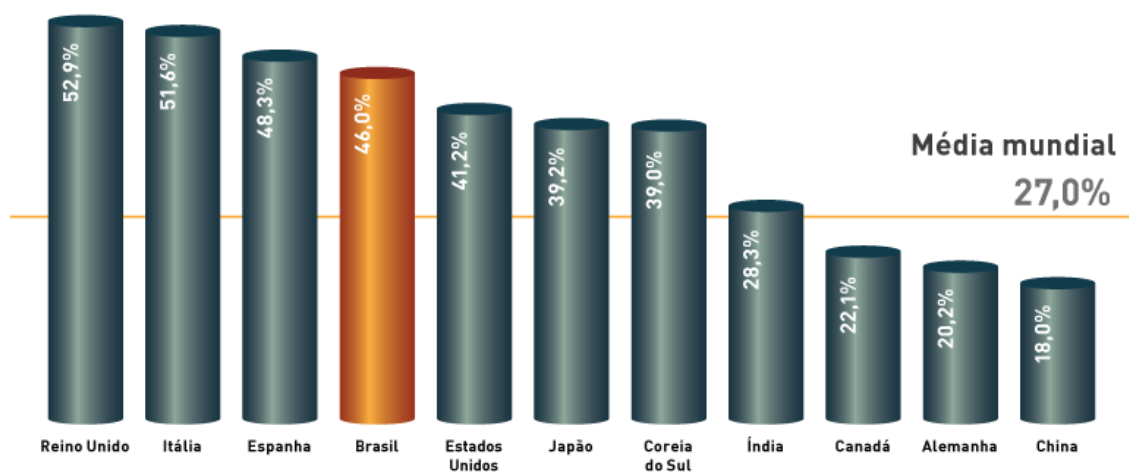
Produção de alumínio secundário

O crescimento da importância da reciclagem é um dos sinais de que o setor do alumínio brasileiro está passando por uma mudança no modelo de negócio em decorrência da diminuição de produção de alumínio primário — consequência dos custos proibitivos da energia elétrica no país, que dificulta a competitividade do upstream.

A produção do alumínio secundário, a partir da reciclagem, tem um consumo de energia 95% menor comparado ao processo do alumínio primário, cuja produção mundial migrou para países como a Rússia e China.

A sucata tem menos etapas para a produção dos perfis extrudados, pois elimina a fase de processamento do alumínio primário. Consequentemente, o custo de produção é menor, exige menos energia elétrica e é mais sustentável.

Vale ressaltar que o Brasil detém, em termos da reciclagem do alumínio, um índice elevado. A relação entre a quantidade de sucata recuperada e o montante de alumínio consumido (consumo doméstico de produtos transformados do alumínio) foi de 46% em 2015, valor superior à média mundial (27%). No caso específico de latas de alumínio, o País é líder mundial em termos de nível de reciclagem – 98,7% em 2015 (ABAL, 2015). É interessante ressaltar que isto se deve em grande medida ao fato de que esta é uma boa opção de renda para a população mais pobre, gerando a proliferação dos “catadores de latinha”.



Fonte: Aluminum Statistics Review 2015 – The Aluminum Association, cálculo ABAL

Figura 4: Relação entre Sucata Recuperada e Consumo Doméstico – 2015

b. Informação do consumo de energia na cadeia de alumínio e sua participação na demanda industrial.

Em 2015, a indústria de metais não-ferrosos foi responsável por 6,7% do consumo energético industrial, e o segmento da cadeia de alumínio foi responsável por 3,6% do consumo energético industrial no País e por 18% do seu consumo de energia elétrica, revelando a marcante característica eletro-intensiva desta indústria. (Cálculo feito pela equipe de Applus-Qualitec com os dados do BEN 2016 para o consumo total de energia e com os dados do PDEA 2016-2020 no caso da energia elétrica)

A energia utilizada é diferente por subsegmentos dentro da cadeia de alumínio.

O subsegmento de bauxita consome praticamente só energia elétrica e o seu consumo específico é muito baixo em comparação com o resto de subsegmentos.

No subsegmento de alumina, observou-se mediante as visitas às plantas do subsegmento, que a eletricidade representa 18% do consumo total de energia, e 82% do consumo de energia total na produção correspondem ao uso de energia térmica na etapa de calcinação e na geração de vapor. As principais fontes de energia térmica utilizadas são o óleo combustível e carvão mineral. Algumas empresas usam gás natural. Há também relatos da intenção de uso de biomassa para essa etapa.

O subsegmento do alumínio primário tem um alto consumo de energia elétrica, pois é necessária uma corrente elétrica de alta intensidade para que ocorra a eletrólise. Também se faz uso de energia térmica nessa etapa, mas em quantidade relativamente pequena, se comparada à etapa anterior de refino.

O processo de reciclagem de alumínio consome somente um 5% da energia que seria necessária para produzir a mesma quantidade de alumínio primário (ABAL,2016), em sua maioria energia térmica nos fornos de fundição de sucata.

Agentes do setor, representados pela Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), vêm reiterando que a indústria de alumínio primário no Brasil vive momentos difíceis em termos de sua competitividade internacional, sendo o custo da energia elétrica adquirida o principal fator.

c. Indicadores que serão quantificados a partir da análise da realidade brasileira atual.

Os indicadores energéticos são uma ferramenta importante para analisar interações entre a atividade econômica e humana, o consumo de energia e as emissões de dióxido de carbono (CO₂). Estes indicadores mostram para quem faz as políticas aonde pode se poupar energia. Além de providenciar informação sobre as tendências do consumo histórico de energia, os indicadores de eficiência podem ser utilizados na modelagem e previsão da futura demanda de energia.

Os indicadores que serão quantificados neste estudo são:

Consumo Específico

Para cada equipamento, planta ou instalação caracterizada por um parâmetro de atividade único, pode-se calcular o consumo específico de energia como o quociente entre o consumo real de energia da instalação e cada unidade de cada atividade. Mede-se em (unidades de energia)/(unidades de produção), por exemplo [GJ/tonelada] ou [kWh/tonelada].

O consumo específico é característico da tecnologia de produção. Pode sofrer mudanças no caso que as instalações perdessem ou ganhassem eficiência por modificação nas condições de operação ou manutenção, assim como em caso de mudança das tecnologias de processo por outras de maior eficiência.

Rendimento Energético

O rendimento energético de uma máquina é a relação entre a quantidade de energia útil e a energia fornecida. Assim, da energia fornecida a uma máquina, uma parte é transformada em energia útil, ou seja, em energia que é na verdade aproveitada pela máquina, e outra parte é dissipada, geralmente sob a forma de calor. Se uma máquina apresenta um elevado rendimento, isso significa que tem poucas perdas de energia, enquanto uma máquina com um baixo rendimento desperdiça grande parte da energia.

O conceito de rendimento energético adotado neste estudo se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo. Esta simplificação, por um lado, facilita a determinação dos rendimentos energéticos de equipamentos em uso e introduz algumas distorções quanto ao significado das perdas energéticas estimadas pelo estudo (BEU, 2005).

Usando esse conceito, o estudo não vai estimar todas as perdas do processo produtivo. As perdas reais serão sempre maiores do que as estimadas, portanto, as possibilidades reais de economia de energia serão maiores que as estimadas através do estudo (BEU, 2005).

Outra questão que se levanta é a de que o rendimento estimado deve retratar a média dos rendimentos de transformação de uma forma de energia final para um dado uso final dentro de um setor de atividade.

Coeficiente de destinação

Os coeficientes de destinação fazem referência às porcentagens de energia que são destinadas a cada uso final de energia (BEU, 2005):

- Força motriz: energia usada em motores estacionários ou de veículos de transporte, individual ou coletivo, de carga, tratores, etc.
- Calor de Processo: Energia usada em caldeiras e aquecedores de água e fluidos térmicos.
- Aquecimento Direto: Energia usada em fornos, fornalhas, radiação, aquecimento por indução, condução e micro-ondas.
- Refrigeração: energia usada em geladeiras, freezers, equipamentos de refrigeração e ar condicionado, tanto de ciclo de compressão como de absorção.
- Iluminação: energia usada em iluminação de interiores e externa.

- Eletroquímica: Energia usada em células eletrolíticas, processos de galvanoplastia, eletroforese e eletrodeposição.
- Outros usos: energia usada em computadores, telecomunicações, máquinas de escritório, xerografia e equipamentos eletrônicos de controle.

Os coeficientes são coletados por meio de entrevistas a empresas, pesquisas junto a fornecedores de equipamentos, programas de governo e outras bases de dados. O Coeficiente de Destinação de uma determinada forma de energia final é impactado por mudanças estruturais nos padrões de consumo da sociedade. O Coeficiente de Eficiência Energética de um determinado equipamento expressa seu rendimento na transformação da energia final em algum uso final, e é impactado por alterações tecnológicas e culturais.

3. DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS PRODUTIVOS PRINCIPAIS DO SEGMENTO INDUSTRIAL

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na superfície da Terra e o primeiro entre os elementos metálicos, sendo o mais moderno dos metais comuns. O seu desconhecimento ao longo do tempo se deve ao fato de que, ao contrário de outros elementos metálicos, ele não ocorre naturalmente em sua forma metálica, existindo sempre em combinação com outros elementos, sendo a bauxita sua principal fonte de obtenção.

As principais características do alumínio são: baixo peso específico, alta resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica. Sua infinita reciclagem apresenta uma ampla variedade de utilização, que o torna o metal não ferroso mais consumido no mundo.

A partir da extração da bauxita é retirada a alumina pelo processo de Bayer, e transformada em alumínio líquido por meio de um processo de redução eletrolítica.

a. Processos de produção principais do subsegmento Bauxita

A produção de alumínio começa com a matéria-prima bauxita, que é uma rocha de cor vermelha formada principalmente por óxido de alumínio (Al_2O_3) e outros compostos em menores quantidades, como sílica, dióxido de titânio, óxidos de ferro e silicato de alumínio. A bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio (Al_2O_3) aproveitável para que a produção de alumínio seja economicamente viável. As reservas brasileiras de bauxita, estando as maiores no estado de Pará com um teor de Al_2O_3 de aproximadamente o 50% na bauxita metalúrgica (Alumínio, DNPM), além da ótima qualidade do minério também estão entre as maiores do mundo.

A extração é feita em jazidas pouco profundas e a céu aberto e que normalmente podem ser trabalhadas durante aproximadamente dois anos. A primeira etapa da extração é a remoção planejada da vegetação e do solo orgânico. A extração, ou lavra, é efetuada utilizando-se retroescavadeiras hidráulicas, que permitem que se explore seletivamente o terreno a diferentes profundidades, para que haja o melhor aproveitamento possível do minério disponível e menor dano ao solo, sendo o material transportado até a planta industrial.

O minério extraído é então transportado para a planta de beneficiamento por carretas basculantes com capacidades que variam entre 10 e 30 toneladas.

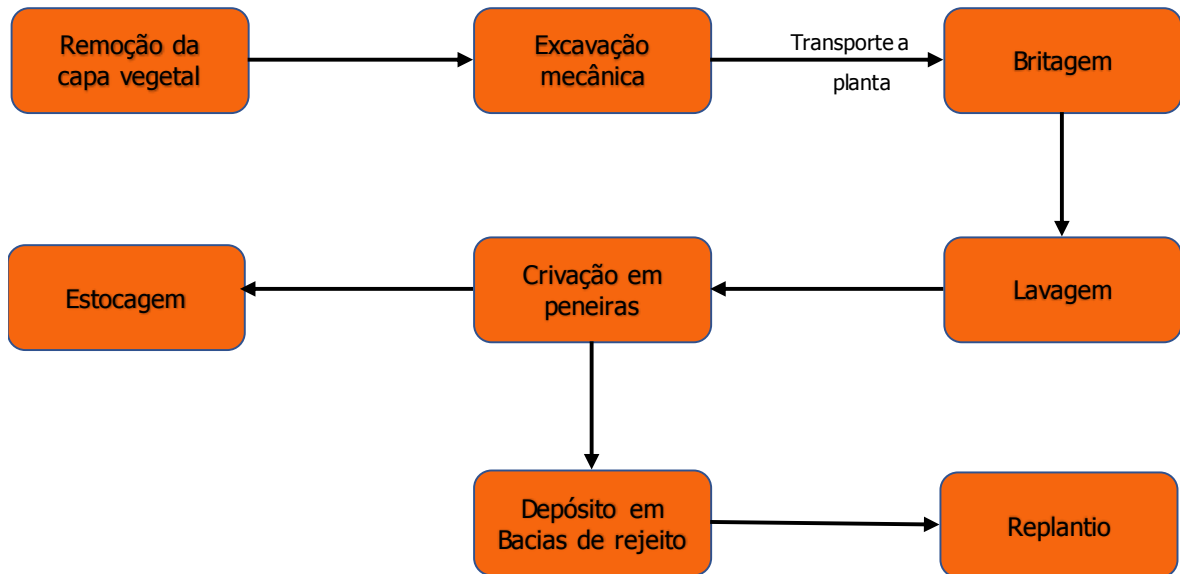
O beneficiamento da bauxita depende dos teores de concentração do minério, além de outras características e inclui a britagem, lavagem, etc., para que se torne adequado ao processamento posterior.

Na planta industrial a primeira etapa do beneficiamento é a britagem, que tem a finalidade de reduzir seu volume e facilitar o trabalho dos equipamentos que trabalham com o material.

Após a etapa de britagem o minério alimenta um silo, o qual alimenta o desagregador. O material entra num cilindro giratório, onde é misturado com água para sua lavagem.

Após essa etapa, o minério úmido passa por ciclones e peneiras de alta frequência onde se retira toda a lama, que é depositada em bacias de rejeitos que, após seu uso, são cobertas e recebem o plantio de espécies nativas, para restabelecer a vegetação natural do local.

O minério agora já na granulometria específica e sem a argila segue para o pátio de estocagem, onde será transportado para as unidades industriais produtoras de Alumina.



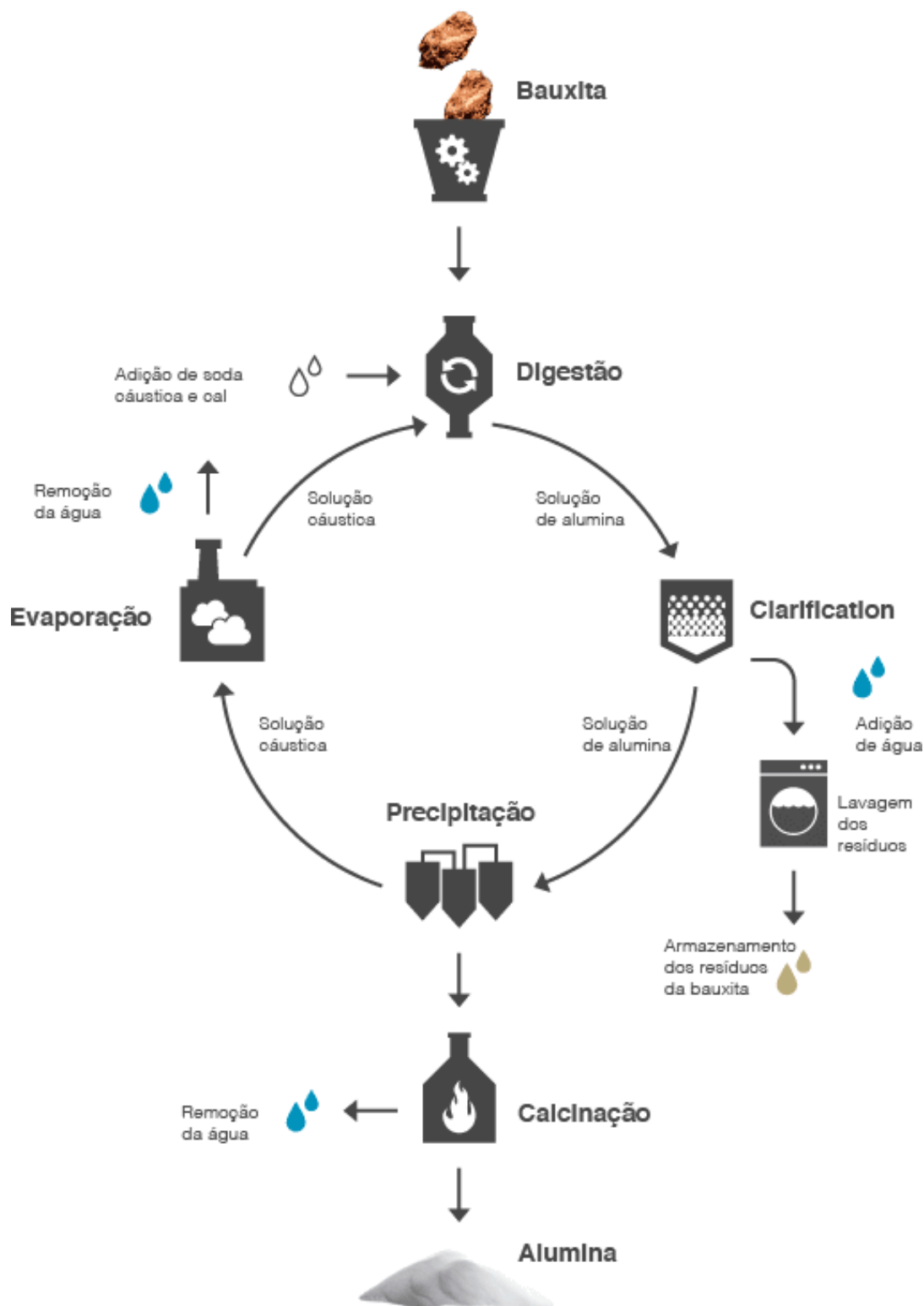
Fonte: Elaboração própria.

Figura 5: Fluxograma do processo de produção da bauxita

b. Processos de produção principais do subsegmento Alumina

O processo pelo qual se refina a alumina é o processo Bayer. Esse processo foi desenvolvido e patenteado por Karl Josef Bayer, em 1888, na Áustria, e foi considerado o marco do nascimento da hidrometalurgia moderna.

O Processo baseia-se na separação no minério Gibbsita ($Al(OH)_3$) da lama contida na bauxita e posterior obtenção de Alumina (Al_2O_3) através de métodos físicos e químicos, descritos mais detalhadamente a seguir.



Fonte: Hydro.

Figura 6: Esquema do processo Bayer

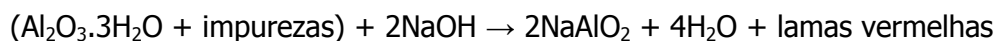
A primeira etapa do processo de produção da alumina é o recebimento da bauxita, que geralmente vêm de várias plantas e é misturada antes da sua utilização no processo Bayer.

O primeiro passo na planta de alumina é a redução do tamanho da bauxita para aumentar a superfície de reação e facilitar o transporte, que se realiza mediante o sistema de cintas até os moinhos de bolas e barras, onde a bauxita entra pelo lado das barras e sai pelo lado das bolas.

Já nos moinhos é adicionado licor de NaOH (soda cáustica) que é recuperado do processo e pré-aquecido depois de passar pela área de evaporação para tirar o excesso de água. Dos moinhos, a bauxita já sai em forma de polpa que é enviada através de tubulações a alta pressão até uns dessilicatadores para tirar o excesso de silício e é enviada aos digestores.

Os digestores são reatores tipo autoclave onde a polpa é dissolvida em soda cáustica concentrada pré-aquecida para formar uma solução enriquecida em aluminato sódico. A temperatura do processo é de 145°C e a pressão é igual ou maior a 450kPa. O tempo de residência da alumina nos tanques é de 2-8 horas, dependendo do teor de silício.

A reação química que se produz nos digestores é a seguinte:



Ao final da digestão, a suspensão que sai do último digestor contendo a solução de aluminato, areias e lamas vermelhas, está a uma temperatura acima do seu ponto de ebulição na pressão atmosférica, tendo que passar por um sistema de resfriamento por expansão, nos chamados tanques flash, onde ocorre a despressurização gradativa até a pressão atmosférica e a diminuição da temperatura até aproximadamente os 100°C. O vapor proveniente é utilizado para pré-aquecer a solução de soda cáustica que vai para os digestores.

Depois da digestão a polpa é diluída de novo com licor fraco que vem do lavado de lamas para diminuir sua viscosidade para facilitar o processo de sedimentação de impurezas nos decantadores, que é onde se produz a clarificação. Nesta fase é comum a adição de polímeros (como hidroxamatos e poliacrilamida) para induzir a floculação das partículas nos espessadores ou até mesmo a utilização de processos de separação com membranas poliméricas. Dos decantadores saem dois produtos:

- O produto que fica embaixo é a lama e a areia, que vai para os lavadores, vários tanques em série. A areia passa por um separador de areia e é descartada. No último tanque, se a lama estiver dentro dos padrões aceitáveis, passa por um filtro a vácuo que separa a soda e o restante de água, e por meio de uma bomba *emmerich* é descartada na barragem de rejeito.
- O produto que fica acima, transborda e vai para a filtração de segurança a alta pressão, que se faz por filtros do tipo "Kelly" compostos de 10 filtros, para tirar as partículas finas em suspensão e evitar a contaminação do produto e o resultado é uma solução cáustica purificada rica em aluminato com um conteúdo de sólidos menor do que 5mg/l.

Depois da filtração de segurança, a solução é enviada a uma seção de resfriamento por expansão instantânea a vácuo com água fria que confere ao licor a temperatura requerida para a precipitação que é em torno de 70°C. Ao diminuir a temperatura, a sobresaturação da solução aumenta e favorece a precipitação do tri hidrato de alumina.

A solução a 70°C é enviada para os tanques de precipitação. Os primeiros tanques são os tanques de aglomeração, onde se adiciona alumina de granulometria fina recuperada do processo como aglomerante, chamada de semente fina, e é agitada por agitadores mecânicos. Após um tempo, a solução ainda não precipitada passa para os tanques de crescimento, onde se adiciona semente grossa, se agita e por último vai para os tanques hidrolisadores que é onde realmente precipita em forma de hidrato ($2\text{Al}(\text{OH})_3$). Este processo de precipitação demora uns 2 dias.

O hidrato se classifica em tanques de sedimentação de diâmetros crescentes, que permitem separar os hidratos de diferentes tamanhos: grossos (produto que vai para o calcinador), médios (sementes grossas que entram nos tanques de crescimento) e finos (que vão para os tanques de aglomeração).

O licor que não precipita volta para o processo, sendo licor pobre, vai para um tanque teste onde é medido o teor de soda no licor e o excesso de água é tirada por meio dos evaporadores, a temperatura de 133°C, cujo vapor é aproveitado de novo no processo no pré-aquecimento da polpa que vai para os digestores.

O hidrato grosso para calcinar precisa ser lavado do licor que contém pelo que vai direto para filtros horizontais nos que se lava o produto várias vezes na contracorrente com água de condensado, contendo finalmente entre 10 e 15% de água. A operação se realiza por meio de filtração a vácuo em filtros planos horizontais rotatórios.

Algumas empresas comercializam hidrato além de alumina, sendo assim, o processo poderia terminar nesta fase para esse produto.

Em seguida, o hidrato se submete a secagem e calcinação. A secagem se consegue aproveitando os gases quentes do calcinador, e, uma vez seco, é enviado para um forno onde é submetido a altas temperaturas (900-1200°C) e se obtém finalmente o produto final, a alumina (Al_2O_3).

A reação é a seguinte:

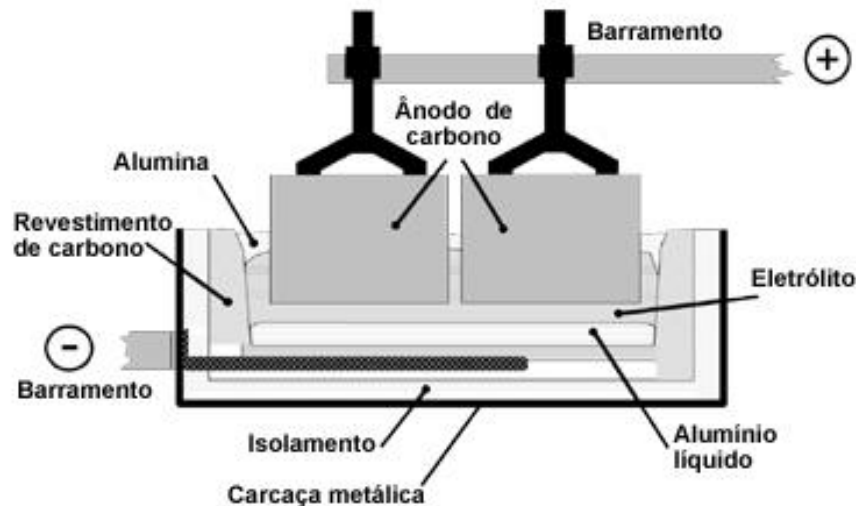


c. Processos de produção principais do subsegmento Alumínio Primário

O processo de extração do Alumínio só foi possível através do processo Hall-Héroult, sendo este a base para a extração de alumínio nas indústrias. O processo foi desenvolvido paralela e simultaneamente por Hall e Héroult, sendo ambos patenteados em 1886. O princípio fundamental do processo Hall-Héroult reside na redução da alumina dentro de cubas eletrolíticas dissolvida em um banho de criolita (floureto de sódio e alumínio - Na_3AlF_6) e de flouretos de um ou mais metais mais eletropositivos que o alumínio, por exemplo, sódio potássio, ou cálcio. Esta fase do processo produtivo é uma fase tipicamente intensiva em termos de consumo de eletricidade.

O processo se desenvolve em fornos especiais revestidos de carbono, também chamados de cubas eletrolíticas, que operam a aproximadamente 960°C . A cuba possui dois componentes principais: os anodos, dispostos na parte superior, e o catodo, ou cuba propriamente dita, onde se processa a eletrólise.

As cubas eletrolíticas são de chapas de aço, revestidos internamente com uma camada de refratário (de baixa condutividade elétrica e térmica) juntamente com carbono e por dentro desta existem eletrodos. O cátodo, normalmente composto de cobre com altíssima pureza é o pólo negativo da cuba eletrolítica. Situa-se na parte inferior da cuba eletrolítica para facilitar o processo. As cubas eletrolíticas têm uma vida útil de 5 anos de funcionamento contínuo.

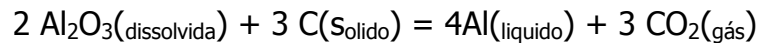


Fonte: Belmonte

Figura 7: Esquema de cuba eletrolítica.

A passagem da corrente elétrica do anodo para o catodo decompõe a alumina em alumínio e oxigênio. Este reage com o carbono do anodo (eletrodo positivo) e o metal se deposita no catodo (eletrodo negativo) sob a forma líquida.

A reação que se produz é a seguinte:



São duas tecnologias usadas no processo Hall-Héroult, que se diferenciam pelo tipo de anodo empregado. As cubas com anodo pré-cozido e as cubas com anodo Söderberg. Os anodos pré-cozidos são feitos em um processo separado, empregando coque de petróleo e piche como matéria-prima. Estes anodos são consumidos durante o processo e têm que ser trocados intermitentemente. Enquanto os anodos Söderberg são cozidos pelo calor da própria cuba eletrolítica, eles não precisam ser trocados, são consumidos continuamente. O oxigênio produzido durante a eletrólise reage com o carvão do anodo para formar uma mistura de CO₂ (75%) e CO (25%).

A eletrólise é feita em cubas conectadas eletricamente em série entre elas. Cada cuba está submetida a uma tensão de 4,1 a 4,5 V e por ela circula uma intensidade de 100.000 a 150.000 A. O alumínio fundido é extraído periodicamente por sucção das cubas. Esta operação costuma acontecer uma vez por dia e costuma se extrair da ordem de uma tonelada de alumínio líquido por cuba, dependendo do tamanho das mesmas. A continuação o alumínio líquido é transferido em cadinhos até os chamados fornos de espera, de onde logo depois segue para máquinas de lingotamento, laminação, etc.

d. Processos de produção principais do subsegmento Alumínio Secundário

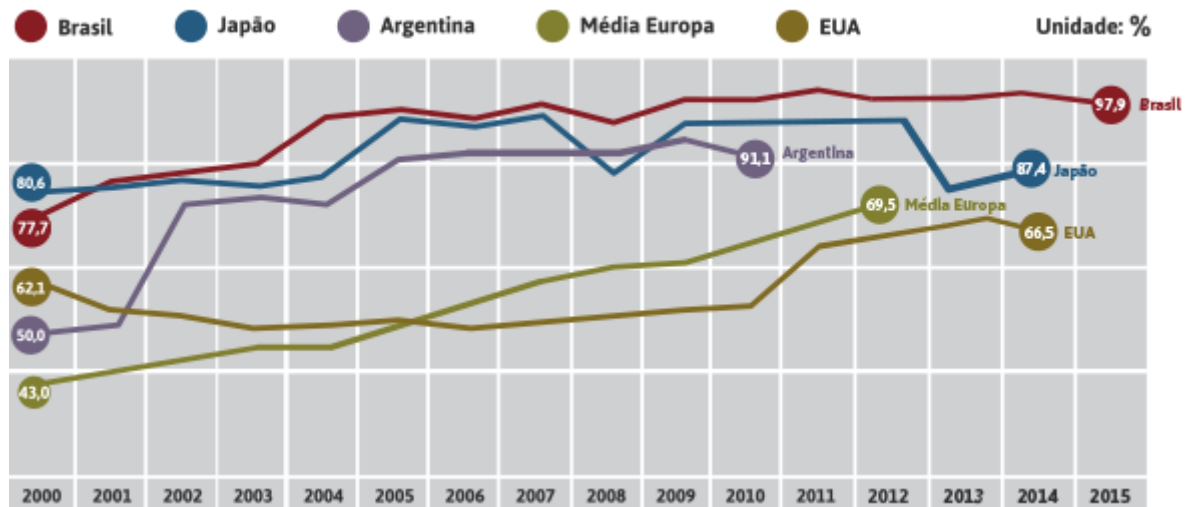
O alumínio é um metal reciclável que gera bom retorno financeiro para os trabalhadores e empresas que atuam nesta área. O processo de reciclagem consiste na reutilização do alumínio para a confecção de novos produtos.

As fontes de alumínio secundário derivam-se de duas vertentes: a) o alumínio de origem industrial que representa 12% da sucata total que é formado por retalhos gerados dentro das próprias fábricas e por usuários que reprocessam o alumínio; e b) o alumínio pós-consumo, que corresponde a materiais consumidos e que chegaram ao final de sua vida útil.

O alumínio pode ser reciclado infinitas vezes, sem perder suas características no processo de reaproveitamento, ao contrário de outros materiais.

A reciclagem do alumínio representa uma combinação única de vantagens. Economiza recursos naturais, energia elétrica (no processo, consome-se apenas 5% da energia necessária para a produção do alumínio primário), além de oferecer ganhos sociais e econômicos.

A reciclagem de latas de alumínio no Brasil atinge um patamar único no mundo: 97,7%. Atualmente, é possível uma lata ser vendida, consumida, coletada, transformada em uma lata nova, engarrafada e estar à venda novamente dentro de um período de 33 dias.



Fonte: Latasa

Figura 8: Porcentagem de latas recicladas por país

O processo produtivo da reciclagem começa com a coleta do material, que é limpo e transformado em fardos. Os fardos são transportados até a usina de reciclagem, onde são armazenados em diferentes pátios de estocagem.

Na primeira etapa do processo industrial esses fardos passam por um desenfardador mecânico e logo depois são conduzidos mediante esteiras até um separador magnético que é composto de várias placas eletromagnéticas que atuam como ímã atraindo as partículas ferrosas.

Após a separação magnética o material é picotado mediante um moinho de martelo e é feita nova separação eletromagnética, passando depois por uma peneira vibratória que retira terra, areia e outros resíduos para reduzir seu volume e facilitar o trabalho dos equipamentos que utilizam o material. Dispõe-se também de um sistema de exaustão para retirar as impurezas do ar.

Os pedaços de alumínio são armazenados e colocados em um forno que realiza a eliminação de tintas e vernizes. O material limpo é compactado de novo em grandes blocos com o objetivo de minimizar o efeito da oxidação quando for fundido, pois, a superfície do alumínio oxida-se instantaneamente quando é exposto ao oxigênio, e são depois levados para um forno de fusão.

Depois de fundidos, os pedaços ficam em estado líquido. O alumínio em estado líquido se desgasifica e é retirada a escória e o hidrogênio dissolvido. O alumínio fundido dissocia rapidamente o hidrogênio do vapor de água e dos contaminantes hidrocarbonatados.

Antes de terminar o processo de refusão, toma-se uma amostra do resultado ainda fundido para uma análise espectroscópica. Dependendo do produto final, adiciona-se alumínio de alta pureza, magnésio, ferro, cobre etc.

Uma vez que se obtém o alumínio com a liga desejada, o forno se abre e se faz a extração do alumínio líquido em umas grandes panelas. A continuação se molda na forma desejada: lingotes, rolos caster, e outros.

4. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA NO ESTUDO

a. Seleção da amostra da pesquisa

Na primeira análise, para proceder à seleção das amostras significativas para a pesquisa, se estabeleceram subsegmentos dentro da cadeia de alumínio resultando na seguinte divisão, cujos processos de produção principais já foram descritos anteriormente:

- Produção de Bauxita;
- Produção de Alumina;
- Produção de Alumínio primário;
- Produção de Alumínio secundário.

Em sequência, se estabeleceu um universo de empresas que estão produzindo atualmente, tomando como base a informação disponível na Associação Brasileira de Alumínio – ABAL, e foram coletados dados de produção e dados de consumo de energia.

Com base nas informações de consumo de energia anteriormente levantadas, foi feita uma análise estatística utilizando neste caso o critério de estatística de proporcionalidade.

Com os valores de energia e a participação dos subsegmentos no total da cadeia de alumínio, calculou-se o valor médio dos anos 2014 e 2015 e a respectiva porcentagem do valor médio. Estimou-se o número de plantas seguindo os seguintes critérios:

- Terá que ser visitada pelo menos uma planta de cada subsegmento.
- Consideraram-se todas as plantas para alumínio primário, dada à importância no consumo de eletricidade no País.
- Considerou-se a proporcionalidade da amostra em relação à proporção do consumo final de energia por subsegmento. Desta forma, o número de plantas amostradas para alumina deve ser similar ao adotado para o alumínio primário.

Uma vez estabelecido o tamanho amostral de cada subsegmento, realizou-se a estratificação de alguns subsegmentos em função do valor de produção das empresas.

Para a seleção final considerou-se em primeiro lugar o número de amostras por subsegmento calculado pelo critério estatístico de proporcionalidade e partindo dessa base, a seleção foi feita seguindo os seguintes critérios:

- Consumo energético: considerou-se este critério como o de maior importância na hora de selecionar as amostras da cadeia de alumínio. Foram escolhidas as empresas que apresentam um maior consumo de energia, tanto térmica quanto elétrica.
- Nível de produção: O critério de produção considerou-se de muita importância para a seleção da amostra, mas não se identificou uma correlação direta de que as indústrias de maior produção disponham da melhor tecnologia para o aproveitamento energético nesse segmento. Com base nesta premissa considerou-se selecionar empresas de níveis diferentes de produção, o qual permite analisar as diferenças tecnológicas utilizadas e, portanto, oportunidades de melhoria diferentes por escala de produção.

- Integração do processo de produção: No setor de alumínio aprecia-se que algumas empresas são representativas em toda a cadeia produtiva. Nota-se que isto é um fator importante de desenvolvimento empresarial e demonstra que a integração no setor torna a produção cada vez mais eficiente. Para efeitos da seleção da amostra foi considerado este fator como de importância para a execução da investigação.
- Localização geográfica: Embora este parâmetro possa ter uma menor importância para a seleção das amostras, tem se considerado como fator na seleção. No caso do alumínio a maiorias das empresas estão localizadas próximas ao recurso primário, e em alguns casos existe uma relação estreita entre o processo de extração da bauxita e o início do processo do alumínio.

b. Seleção das etapas do processo de produção

Para fins de pesquisa de consumo energético serão consideradas as seguintes etapas de processo por subsegmento:

- Subsegmento Bauxita: Britagem, desagregação e peneiramento.
- Subsegmento Alumina: Digestão, clarificação, calcinação.
- Subsegmento Alumínio Primário: Fabricação de anodos/preparação da pasta, redução e fundição.
- Subsegmento Alumínio Secundário: Reciclagem e refusão

c. Tratamento de dados

Todos os dados referentes aos consumos energéticos utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pelas empresas visitadas.

Os dados utilizados são do ano de 2016, tais quais: energia elétrica, produção, carvão, óleo combustível e gás natural. Algumas informações foram estimadas pelas empresas pois elas não a tinham ou não faziam seu acompanhamento conforme o desenvolvido nesse estudo.

Para a obtenção dos valores médios de cada subsegmento realizou-se uma média simples dos valores das empresas de cada subsegmento.

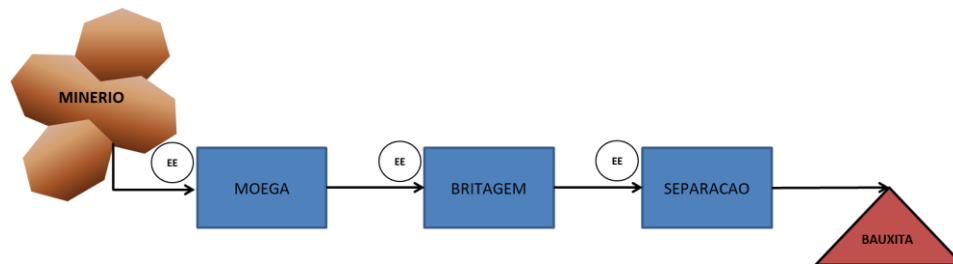
5. INDICADORES DE CONSUMO ENERGÉTICO POR SUBSEGMENTO

a. Subsegmento Bauxita

i. Situação atual

i.1) Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados

O minério é extraído e enviado por caminhões até a planta industrial. Os caminhões descarregam o material alimentando a moega, passando por uma britagem primária e uma secundária através de dois britadores a fim de adequar a granulometria do material ao processo de produção. Depois segue para a separação da argila da bauxita no Scrubber e a continuação passa por um sistema de peneiras vibratórias onde a bauxita segue para a pilha de minério e a argila vai para a barragem, conforme mostrado na figura abaixo.



Fonte: Elaboração própria

Figura 9: fluxograma de processo simplificado

Além desses equipamentos principais temos os equipamentos secundários como são as esteiras para o transporte de material na planta, os compressores de ar para o controle e acionamento de válvulas, e as bombas, tanto as de utilidades quanto as que servem para captação de água nova.

i.2) Fontes de energia

O processo de produção da bauxita utiliza somente a energia elétrica na alimentação da força motriz e no sistema de iluminação.

i.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Sendo o consumo de energia elétrica destinado, na sua maioria, ao uso de força motriz, os equipamentos que mais consomem energia são os motores elétricos. Nota-se que as plantas de bauxita utilizam bastante energia em iluminação, pois tem grandes áreas exteriores que precisam ser iluminadas à noite.

i.4) Indicadores energéticos

O consumo específico de energia elétrica total está em 5,74 kWh/tonelada, podendo ser dividido em 1,86 kWh/tonelada na etapa de britagem, 2,53 kWh/tonelada na etapa de desagregação e 1,35 kWh/tonelada na etapa de peneiramento.

Rendimento energético

O conceito de rendimento energético se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo, e ele retrata a média dos rendimentos de transformação.

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Vapor	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Metalúrgico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Lenha	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Produtos da Cana	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Primárias	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Diesel	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Combustível	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gasolina	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
GLP	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Querosene	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gases de Processo	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Coque de Carvão Mineral	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Eletricidade	93,90%	0,00%	0,00%	0,00%	37,00%	0,00%	0,00%
Carvão vegetal	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Álcool Etilico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Alcatrão	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 4. Indicadores de rendimento energético atuais, subsegmento Bauxita

Coefficientes de Destinação

Os coeficientes de destinação referem-se à distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem segundo os usos finais da energia.

No caso do subsegmento bauxita, consome-se somente energia elétrica, que é distribuída conforme mostrado na tabela 5.

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTES DE DESTINAÇÃO (%)							Total
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	
Gás Natural	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Vapor	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Metalúrgico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Lenha	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Produtos da Cana	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Primárias	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Diesel	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Combustível	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gasolina	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
GLP	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Querosene	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gases de Processo	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Coque de Carvão Mineral	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Eletricidade	91,19%	0,00%	0,00%	0,00%	8,81%	0,00%	0,00%	100,00%
Carvão vegetal	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Álcool Etílico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Alcatrão	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5. Coeficientes de destinação atuais, subsegmento Bauxita

i.5) Investimentos necessários para reposição de equipamentos

Com a reposição dos equipamentos irá existir um ganho na força motriz, pois os motores comercializados hoje em dia já são mais eficientes do que no início de operação das plantas. Assim, segue a lista de reposição para os equipamentos atuais, sendo que os preços foram obtidos em reais, com base 2017 e sem transporte:

EQUIPAMENTO	CUSTO
Lâmpada Vapor de Sódio (400 W)	R\$ 46,90
Motores Alto Rendimento (5 CV)	R\$ 1.551,34
Motores Alto Rendimento (50 CV)	R\$ 11.189,75
Motores Alto Rendimento (75 CV)	R\$ 17.452,57
Motores Alto Rendimento (100 CV)	R\$ 20.485,34
Compressor de Ar com Inversor de Frequência (160 kW)	R\$ 220.000,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017

Tabela 6. Investimento para reposição de equipamentos com a mesma eficiência

ii. Condições com tecnologias mais eficientes

ii.1) Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

Com base na visita e nos estudos realizados não haverá alteração tanto na produção quanto nas etapas de processo, a planta ficará com o mesmo fluxo de processo e produção.

Nas indústrias, os pontos principais de desperdício de energia são os motores elétricos, a iluminação e os sistemas de geração de calor ou resfriamento. Estes estão interligados aos métodos de operação, normalização de processos, treinamento e qualificação de colaboradores.

Observa-se que para o subsegmento de bauxita, na ordem de 90% da energia elétrica é empregada em força motriz. Torna-se evidente, portanto, a relevância que os motores elétricos assumem no consumo de eletricidade por parte deste subsegmento.

Deste modo, numa perspectiva de melhoria de eficiência energética, torna-se fundamental analisar as ações que podem ser levadas a cabo para tal, como a adequação da potência do motor à carga, o uso de acionadores e o uso de motores de alto rendimento.

A análise do subsegmento de bauxita mostra também que o outro 10% de energia elétrica é empregada em iluminação, neste caso as plantas utilizam lâmpadas de vapor de sódio de 400W. Portanto, a medida de eficiência energética a considerar será a troca dessas lâmpadas de vapor de sódio por lâmpadas de LED 200 W, as quais tem seu consumo de energia elétrica 60% menor do que as atuais.

Quanto aos **motores de alto rendimento**, são em geral mais caros que os motores standard ou motores normais de linha, mas podem apresentar vantagens significativas em diversos casos, devido ao seu rendimento superior.

Os motores de alto rendimento são projetados tendo em conta a maximização do seu rendimento sem aumentar desmesuradamente o custo de fabricação. Para tal, é feita uma otimização tanto do processo de dimensionamento como da escolha e aplicação de todos os materiais empregados na sua fabricação, de modo a minimizar as perdas de energia que ocorrem durante a operação do motor.

Como resultado deste processo de otimização, os motores de alto rendimento costumam operar a uma temperatura mais baixa, resultando numa vida útil maior dos mesmos. Além do mais, apresentam uma menor necessidade de manutenção e também um menor nível de ruído devido ao melhor balanceamento e menores tolerâncias de fabricação.

As principais alterações que costumam constar num motor de alto rendimento são as seguintes:

- Chapas magnéticas de melhor qualidade (aço silício);
- Maior volume de cobre, que reduz a temperatura de operação;
- Enrolamentos especiais, que produzem menos perdas estatóricas;

- Rotores tratados termicamente, reduzindo perdas rotóricas;
- Altos fatores de preenchimento das ranhuras, que provêm melhor dissipação do calor gerado;
- Anéis de curto circuito dimensionados para reduzir as perdas pelo efeito Joule;
- Projetos de ranhuras do motor são otimizados para incrementar o rendimento.

Os **inversores de frequência** são normalmente utilizados para acionar máquinas ou equipamentos que requerem algum tipo de movimento controlado, como no caso das plantas de bauxita, a velocidade de rotação do motor do compressor de ar.

Os motores mais amplamente utilizados nos acionamentos elétricos são os motores de indução monofásicos e trifásicos. Estes motores, quando alimentados com tensão e frequência constantes, sempre que não estejam operando a plena carga (potência da carga igual à potência nominal do motor) estarão desperdiçando energia.

O variador eletrônico de velocidade por variação de frequência é um equipamento composto de elementos eletrônicos de potência, que aciona um motor tipo gaiola e realiza seu arranque e sua parada de maneira suave. Adicionalmente, varia de maneira controlada a velocidade do motor. Mediante a variação da frequência aplicada ao motor se varia a velocidade do motor com base na seguinte relação:

$$n_s = \frac{120 * f}{p}$$

Onde: n_s é a velocidade sincrônica, f é a frequência aplicada, e p é o número de pólos.

Estes sistemas eletrônicos de variação contínua de velocidade proporcionam, entre outras, as seguintes vantagens:

- Economia de energia;
- Melhoramento do desempenho de máquinas e equipamentos, devido à adaptação da velocidade a os requisitos do processo;
- Elimina o pico de corrente na partida do motor;
- Reduz a frequência de manutenção dos equipamentos.

Somente com a utilização dos inversores de frequência, não se garante que os ganhos se perpetuarão, existem outras ações que deverão ser feitas em conjunto para garantir uma eficiência global do sistema, tais como a eliminação de vazamentos, controle da temperatura de entrada do compressor (conforme projeto) e utilização dos consumidores finais conforme especificados pelos fabricantes.

Enquanto à mudança da tecnologia na iluminação, recomenda-se a utilização de lâmpadas de **LED**.

Atualmente, a lâmpada mais eficiente é a LED (*Light Emitting Diode*), isso porque sua eficiência luminosa é maior do que as das outras lâmpadas. Ou seja, gasta menos energia para gerar a mesma iluminação. O baixo consumo de energia, vida útil mais longa (aproximadamente 50.000 horas) e menor impacto ambiental, pois não utilizam mercúrio ou qualquer outro elemento que cause danos à natureza e tampouco emitem radiação ultravioleta ou infravermelha, são as principais características das LED, além de

atualmente ser fabricada em vários formatos para atender as mais diversas atividades e ambientes, com significativos índices de economia.

A tabela embaixo mostra as equivalências e o potencial de economia de energia entre as lâmpadas LED e as lâmpadas de vapor de sódio, que são as mais utilizadas no subsegmento de bauxita.

Lâmpada LED	Lâmpada Convencional	Economia de energia
LED High Power 30W	Vapor Metálico/Sódio 70W+21W (reator)	67%
LED High Power 60W	Vapor Metálico/Sódio 150W+45W (reator)	69%
LED High Power 72W 360°	Vapor Metálico/Sódio 150W+45W (reator)	63%
Refletor LED 30W	Vapor Metálico/Sódio 70W+21W (reator)	67%
Refletor LED 50W	Vapor Metálico/Sódio 100W+30W (reator)	61%
Refletor LED 120W	Vapor Metálico/Sódio 250W+75W (reator)	63%
Refletor LED 200W	Vapor Metálico/Sódio 400W+120W (reator)	63%
High Bay LED Industrial 50W	Vapor Metálico/Sódio 100W+30W (reator)	61%
High Bay LED Industrial 100W	Vapor Metálico/Sódio 200W+60W (reator)	61%
High Bay LED Industrial 120W	Vapor Metálico/Sódio 250W+75W (reator)	63%
High Bay LED Industrial 200W	Vapor Metálico/Sódio 400W+120W (reator)	63%
LED Outdoor 84W	Vapor Metálico/Sódio 200W+60W (reator)	67%
LED Outdoor 112W	Vapor Metálico/Sódio 250W+75W (reator)	63%
LED Outdoor 120W	Vapor Metálico/Sódio 250W+75W (reator)	63%

Fonte: HTL instalação e manutenção elétrica.

Tabela 7: Equivalência entre lâmpadas LED e convencionais

ii.2) Fontes de energia

Mesmo utilizando tecnologias mais eficientes o processo de produção da bauxita irá utilizar somente a energia elétrica direta onde alimenta a força motriz e o sistema de iluminação.

ii.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Os principais equipamentos consumidores de energia elétrica continuarão sendo os mesmos, os motores dos grandes equipamentos como os britadores, o scrubber e as peneiras vibratórias.

Como a planta já utiliza os motores de alto rendimento deverá continuar sua utilização, mas agora, quando alguns motores forem substituídos por outros novos também de alto rendimento, esse rendimento será maior do que o rendimento dos motores já instalados.

O sistema de ar comprimido também já tem seu acionamento por inversores de frequência, o qual possibilita uma operação mais eficiente, pois varia a velocidade em função da demanda de ar da planta.

Já no sistema de iluminação é onde ocorre a mudança de tecnologia, passando a utilizar o sistema de LED.

As informações mais detalhadas sobre os motores de alto rendimento, inversores de frequência e lâmpada de Led, já foram apresentadas no capítulo ii.1) Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados.

ii.4) Indicadores energéticos

Em função da troca da tecnologia no sistema de iluminação, a utilização de motores com rendimento melhor, de 95,5%, e de ações de gestão que permitem uma otimização do consumo energético, seja por dimensionamento ou operação diferente da projetada, o consumo específico energia elétrica total da planta proposto fica na ordem de 5,32 kWh/tonelada, podendo ser dividido em 1,72 kWh/tonelada na etapa de britagem, 2,35 kWh/tonelada na etapa de desagregação e 1,25 kWh/tonelada na etapa de peneiramento.

Rendimento energético

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Vapor	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Metalúrgico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Lenha	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Produtos da Cana	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Primárias	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Diesel	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Combustível	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gasolina	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
GLP	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Querosene	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gases de Processo	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Coque de Carvão Mineral	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Eletricidade	95,5%	0,0%	0,0%	0,0%	85,0%	0,0%	0,0%
Carvão vegetal	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Álcool Etílico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Alcatrão	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaboração própria com dados de Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017

Tabela 8. Indicadores de rendimento energético na situação alternativa, subsegmento de Bauxita

Coeficientes de Destinação

Os coeficientes de destinação referem-se à distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem segundo os usos finais da energia.

No caso do subsegmento bauxita, consome-se somente energia elétrica, que é distribuída segundo a tabela abaixo.

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTES DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Carvão Vapor	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Carvão Metalúrgico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Lenha	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Produtos da Cana	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Outras Fontes Primárias	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Óleo Diesel	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Óleo Combustível	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Gasolina	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
GLP	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Querosene	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Gases de Processo	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Coque de Carvão Mineral	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Eleticidade	95,25%	0,00%	0,00%	0,00%	4,75%	0,00%	0,00%	100,0%
Carvão vegetal	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Álcool Etílico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%
Alcatrão	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,0%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 9. Coeficientes de destinação na situação com tecnologias mais eficientes, Subsegmento de Bauxita.

ii.5) Investimentos necessários para reposição de equipamentos de tecnologia mais eficiente

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objeto desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos, portanto, realizamos uma amostragem com base 2017 de alguns equipamentos e seus preços, em reais e sem o transporte, pois esse difere de região para região, são:

EQUIPAMENTO	CUSTO
High Bay LED Industrial (200 W)	R\$ 1.060,00
Motores Alto Rendimento (5 CV)	R\$ 1.551,34
Motores Alto Rendimento (50 CV)	R\$ 11.189,75
Motores Alto Rendimento (75 CV)	R\$ 17.452,57
Motores Alto Rendimento (100 CV)	R\$ 20.485,34
Compressor de Ar com Inversor de Frequência (160 kW)	R\$ 220.000,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017

Tabela 10. Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência

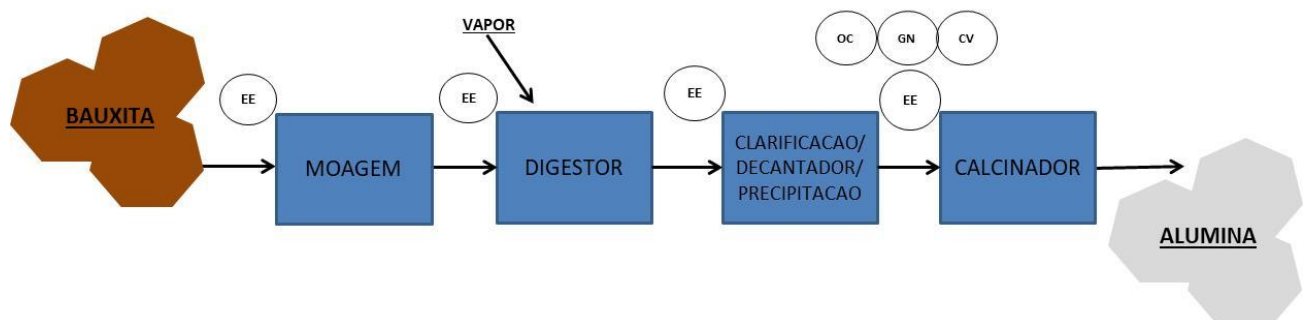
b. Subsegmento Alumina

i. Situação atual

i.1) Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados

As empresas selecionadas são distintas em função da sua produção e ano de início de operação, mas utilizam o mesmo processo produtivo, o Bayer, como informado no item 3b.

Na figura 10 temos um fluxograma indicando as principais etapas do processo, que começa com a moagem da bauxita e a adição preliminar de soda, esse material segue para os digestores, que são fornos tipo autoclave, onde a soda é aquecida com vapor direto sob pressão. A continuação ocorre à clarificação, que é a separação do material nos decantadores. O material que fica embaixo é a lama e areia que é lavada e descartada na barragem, e o produto que fica acima é o licor rico em hidrato de alumínio que passa por uma filtragem de segurança, que retém a maior parte de sólidos e a solução passa pela precipitação onde a soda é separada do hidrato em tanques com agitadores mecânicos nos que fica por um período de até 48 horas, depois segue para a classificação e daí para os fornos calcinadores onde se obtém a alumina.



Fonte: Elaboração própria

Figura 10: fluxograma do processo de produção da alumina simplificado

i.2) Fontes de energia

No processo de produção da alumina, a energia elétrica é utilizada para a força motriz e iluminação e a energia térmica nas caldeiras e calcinadores.

Nos calcinadores existe a possibilidade de utilizar o gás natural ou óleo combustível, como verificado nas visitas, sendo ele utilizado de forma direta.

Já na geração de vapor pode-se utilizar tanto o gás natural, óleo combustível ou carvão como combustíveis, sendo na maioria dos casos caldeiras de baixa pressão.

As empresas utilizam contratos de energia no mercado livre, estando alguma no sistema de distribuição e outras conectadas diretamente na rede básica. Algumas empresas possuem caldeiras de alta pressão com cogeração.

i.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Do consumo total das plantas, em média 15% é em energia elétrica e o outro 85% é energia térmica. Portanto, os maiores equipamentos consumidores de energia serão as caldeiras, empregadas na geração de vapor necessário para etapa de digestão e aquecimento de soda do processo, e os calcinadores, consumidores de aproximadamente um terço da energia térmica da planta.

Os maiores consumidores de energia elétrica são os equipamentos de ar comprimido, responsáveis pelo bombeamento de líquidos, e grandes equipamentos como moinhos, decantadores, precipitadores, e outros.

i.4) Indicadores energéticos

O consumo específico médio de energia elétrica verificado nas visitas está na ordem de 217 KWh por tonelada.

Para calcular o consumo específico térmico, foram realizadas conversões nas unidades de medida, pois devem ser comparados vários energéticos: gás natural, óleo combustível e GLP.

A unidade utilizada para expressar esse indicador é o tep (toneladas equivalentes de petróleo), resultando assim o consumo específico na ordem de 0,72 tep por tonelada.

Pode-se separar o consumo específico médio de energia elétrica, na moagem 24 kWh por tonelada, digestão em 63 kWh por tonelada, clarificação em 54 kWh por tonelada e calcinação em 76 kWh por tonelada.

Rendimento energético

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	0,00%	93,71%	87,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Vapor	0,00%	92,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Metalúrgico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Lenha	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Produtos da Cana	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Primárias	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Diesel	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Combustível	0,00%	86,00%	82,85%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gasolina	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
GLP	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Querosene	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gases de Processo	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Coque de Carvão Mineral	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Eletricidade	93,90%	0,00%	0,00%	0,00%	37,00%	0,00%	0,00%
Carvão vegetal	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Álcool Etílico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Alcatrão	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 11. Indicadores de rendimento energético atuais, Subsegmento Alumina

Coefficientes de destinação

Os coeficientes de destinação referem-se à distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem segundo os usos finais da energia.

No caso do subsegmento alumina, consome-se somente energia elétrica e energia térmica, que é distribuída segundo a tabela abaixo.

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTES DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	0,0%	65,3%	34,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Carvão Vapor	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Carvão Metalúrgico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Lenha	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Produtos da Cana	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Primárias	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Diesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Combustível	0,0%	31,9%	68,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Gasolina	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
GLP	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Querosene	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gases de Processo	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Coque de Carvão Mineral	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Eleticidade	99,91%	0,0%	0,0%	0,0%	0,09%	0,0%	0,0%	100,0%
Carvão vegetal	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Álcool Etilico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Alcatrão	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 12. Coeficientes de destinação atuais, Subsegmento Alumina.

i.5) Investimentos necessários para reposição de equipamentos

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objeto desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos, portanto, realizamos uma amostragem com base 2017 de alguns equipamentos e seus preços, em reais e sem o transporte, pois esse difere de região para região, são:

EQUIPAMENTO	CUSTO
Lâmpada Vapor de Sódio (400 W)	R\$ 46,90
Motores Alto Rendimento (5 CV)	R\$ 1.551,34
Motores Alto Rendimento (50 CV)	R\$ 11.189,75
Motores Alto Rendimento (75 CV)	R\$ 17.452,57
Motores Alto Rendimento (100 CV)	R\$ 20.485,34
Caldeira a biomassa, 105 bar, 520 C	R\$ 88.000.000,00
Compressor de Ar (290 kW)	R\$ 176.000,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017

Tabela 13. Investimento para reposição de equipamentos com a mesma eficiência

ii. Tecnologias mais eficientes

ii.1) Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

As tecnologias mais eficientes no setor de alumina não irão gerar nenhuma alteração tanto na produção quanto nas etapas de processo nem nos equipamentos utilizados.

As mudanças irão ocorrer na utilização de motores de alto rendimento, iluminação a LED e sistemas de ar comprimido com acionamento por inversor de frequência para a melhoria da eficiência de energia elétrica e na instalação de economizadores e caldeiras de alta pressão com cogeração para a melhoria da eficiência de energia térmica, além de ações de gestão adequadas.

A peça conhecida como **economizador de caldeiras a vapor** tem a função de diminuir os gastos com operação e manutenção do equipamento, durante todo o tempo em que ele estiver funcionando. Em caldeiras de grande porte, a economia pode não parecer relevante, contudo, no longo prazo é possível observar os benefícios.

Como o próprio nome indica, a função do economizador é aproveitar o calor residual dos gases de combustão que acabaram de deixar a fornalha. Esses gases passam por um trocador de calor e aumentam a temperatura da água de alimentação da caldeira. Geralmente, são usados trocadores de calor do tipo tubos encurvados e, mais raramente, trocadores de placas.

A utilização de um equipamento economizador de caldeira não só evita a perda de calor, mas também pode estender a vida útil da caldeira. Mudanças de temperatura causadas pelo uso de refrigerador de água de alimentação podem criar desgaste na caldeira ao longo do tempo. Quando a água de alimentação é aquecida, o diferencial de temperatura é menos extremo, colocando menos pressão na caldeira e dando-lhe uma vida útil mais longa. É importante para a indústria integrar esse dispositivo aos seus equipamentos, caso ainda não o tenham, pois é uma forma de garantir maior tempo de vida ao aparelho.

No subsegmento de alumina, o qual utiliza grandes quantidades de vapor no processo, é muito interessante falar de **caldeiras de alta pressão com cogeração**, mesmo que esta decisão seja considerada estratégica para cada empresa.

As caldeiras industriais funcionam pelo aquecimento de água para fabricar vapor, e usam este mesmo vapor para os trabalhos de aquecimento ou cogeração de energia. As caldeiras podem ser de baixa ou alta pressão.

Neste ciclo de cogeração, a energia térmica resultante da combustão é transferida, através da caldeira, para a água que vaporiza e superaquece. O vapor superaquecido é expandido em uma turbina que aciona uma carga mecânica (ou gerador elétrico). O vapor é extraído na saída da turbina, nas condições de temperatura e pressão requeridas para o processo que utiliza este calor útil. Geralmente, o fluido é devolvido à caldeira no estado de condensado para reinicializar o ciclo de transferência de energia.

Esse ciclo de cogeração permite a utilização de combustíveis mais baratos, como resíduos industriais, carvão, lenha, bagaço de cana etc., muitas vezes, os únicos disponíveis no local.

A vantagem desta solução é que o consumidor economiza o combustível que necessitaria para produzir o calor do processo. A eficiência energética é desta forma, bem mais elevada, por tornar útil até 85% da energia do combustível.

O inconveniente da cogeração é que o calor só pode ser usado perto do equipamento, o que limita estas instalações a unidades relativamente pequenas se comparadas com os geradores das concessionárias.

Também podem ser feitas outras recomendações em relação à gestão e manutenção das caldeiras, cuja aplicação não precisa de investimento.

ITEM	SEM INVESTIMENTO	AÇÃO	ECONOMIA EM %
1	Reduzir excesso de ar.	Regulagem da combustão.	5 a 10%
2	Reduzir temperatura de saída dos gases.	Regulagem da combustão. Limpeza da caldeira.	1% a cada 5 °C
3	Reduzir pressão de trabalho.	Verificar necessidade real de pressão.	1% a cada 5 Bar
4	Otimizar temperatura do combustível.	Verificar com frequência a viscosidade do combustível.	Até 5%
5	Otimizar pressão de atomização do combustível.	Seguir indicações do fabricante do queimador.	Até 1%
6	Reduzir descarga de fundo.	Conforme análise de água da caldeira.	Até 1%
7	Otimizar sequência de queima.	Ajuste da modulação.	5 a 10%
8	Otimizar sequência de queima de vários queimadores.	Ajuste da modulação.	2 a 7%
9	Eliminar vazamentos de vapor.	Inspeção das instalações.	Até 10%
10	Eliminar defeitos em purgadores.	Inspeccionar todos.	Até 5%

Fonte: ELEKTRO (s.d.)

Figura 11: Medidas eficiência energética para caldeiras, sem investimento.

Deverão ocorrer a mudanças de motores standard para **motores de alto rendimento** e até de alto rendimento para um com rendimento superior, pois há plantas em operação há cinquenta anos, quarenta e trinta anos.

Recomenda-se também a troca de tecnologia na iluminação por lâmpadas de **LED**, e o acionamento do sistema de ar comprimido com **inversor de frequência**.

Existem muitas ações de gestão que não necessitam e investimento, onde se pode através de uma análise estatística (variabilidade) avaliar o comportamento de uma determinada área ou equipamento, onde se aplica o sistema para a redução dessa variabilidade com controle, conforme listagem abaixo:

- Redução da rotação dos motores de correias transportadoras
- Parada dos equipamentos que ficam rodando em vazio/sem carga
- Controle de temperatura de entrada no sistema de ar comprimido
- Utilização da pressão de uso do ar comprimido de acordo com a informação do fabricante
- Criação de programa de caças de vazamentos (todos os tipos)

Essas ações, nesse subsegmento, geram uma melhora na forma de operação e ainda gera uma economia de energéticos da ordem de 5% a 10%.

ii.2) Fontes de energia

As variações nas fontes de energia térmica se darão em função da oferta dos energéticos nas regiões, como a oferta de gás natural na região Sudeste e do carvão mineral na região Norte.

Continuará se utilizando a energia elétrica empregada em força motriz e iluminação.

ii.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Os principais equipamentos consumidores de energia continuarão a ser os mesmos só que aplicando as medidas necessárias para a melhora na eficiência energética.

As caldeiras consomem aproximadamente o 70% da energia térmica e calcinadores o 30% restante. Motores de ar comprimido e grandes máquinas de processo são os maiores consumidores de energia elétrica.

ii.4) Indicadores energéticos

O consumo específico médio de energia elétrica verificado está na ordem de 193 kWh/ton. Para o consumo específico térmico, em função de combustíveis diferentes (gás natural e óleo combustível), foi feita a conversão para tep, e o indicador térmico ficou em 0,68 tep por tonelada.

Pode-se separar o consumo específico médio de energia elétrica, na moagem 21 kWh por tonelada, digestão em 56 kWh por tonelada, clarificação em 49 kWh por tonelada e calcinação em 67 kWh por tonelada.

Rendimento energético

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	0,00%	94,88%	89,18%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Vapor	0,00%	92,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Metalúrgico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Lenha	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Produtos da Cana	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Primárias	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Diesel	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Combustível	0,00%	87,75%	83,82%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gasolina	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
GLP	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Querosene	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gases de Processo	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Coque de Carvão Mineral	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Eleticidade	95,50%	0,00%	0,00%	0,00%	85,00%	0,00%	0,00%
Carvão vegetal	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Álcool Etílico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Alcatrão	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaboração própria com dados de Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017.

Tabela 14: Indicadores de rendimento energético situação com tecnologias mais eficientes, Subsegmento Alumina

Coefficientes de Destinação

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTES DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	0,0%	65,0%	35,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Carvão Vapor	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Carvão Metalúrgico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Lenha	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Produtos da Cana	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Primárias	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Diesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Combustível	0,0%	32,1%	67,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Gasolina	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
GLP	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Querosene	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gases de Processo	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Coque de Carvão Mineral	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Eleticidade	99,95%	0,0%	0,0%	0,0%	0,05%	0,0%	0,0%	100,0%
Carvão vegetal	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Álcool Etílico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Alcatrão	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 15. Coeficientes de destinação na situação com tecnologias mais eficientes, Subsegmento Alumina

ii.5) Investimentos necessários para reposição de equipamentos de tecnologia mais eficiente

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objetivo desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos, portanto, foi realizada uma amostragem de alguns equipamentos e seus preços para o ano base 2017 em reais sem o transporte, pois esse difere de região para região, são:

EQUIPAMENTO	CUSTO
High Bay LED Industrial (200W)	R\$ 1.060,00
Motores Alto Rendimento (5 CV)	R\$ 1.551,34
Motores Alto Rendimento (50 CV)	R\$ 11.189,75
Motores Alto Rendimento (75 CV)	R\$ 17.452,57
Motores Alto Rendimento (100 CV)	R\$ 20.485,34
Compressor de Ar (290 kW)	R\$ 176.000,00
Economizador para Caldeira	R\$ 1.000.000,00
Caldeira a Biomassa de Alta Pressão (105 bar) com cogeração (45 MW)	R\$ 148.500.000,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017, fonte própria para a caldeira de biomassa (estudos realizados em 2016 atualizados com dólar e IGPM)

Tabela 16. Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência

c. Subsegmento Alumínio Primário

i. Situação atual

i.1) Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados

Foram visitadas duas plantas, e cada uma delas utiliza um processo diferente de fabricação, o processo Söderberg e o processo Prebake (anodos pré-cozidos).

A figura 12 mostra o fluxo de processo, que é igual nos dois casos. O que varia de um processo para o outro é o tipo de anodo empregado. No processo Prebake, os anodos pré-cozidos são feitos em um processo separado, empregando coque de petróleo e piche como matéria prima, estes anodos são consumidos durante o processo e têm que ser trocados intermitentemente. Enquanto os anodos Söderberg são cozidos pelo calor da própria cuba eletrolítica, eles não precisam ser trocados, são consumidos continuamente.



Fonte: ABAL-Cadeia Primária

Figura 12: Fluxo de processos de produção do alumínio primário

i.2) Fontes de energia

O processo de produção do alumínio primário utiliza a energia elétrica principalmente na redução eletrolítica e em menor quantidade também na alimentação da força motriz e o sistema de iluminação. A energia térmica (gás natural e óleo combustível) é utilizada nos fornos de fundição e nas caldeiras. Existe também o uso do GLP para aquecer o alumínio líquido no caminho para a fundição.

Cabe salientar que o processo de produção do alumínio primário é muito eletrointensivo. Algumas plantas dispõem de várias usinas hidroelétricas que fornecem energia a planta;

algumas dessas usinas estão ligadas ao SIN (sistema integrado nacional) e outras (ligados diretamente à fábrica), são subestações complexas, pois em uma única subestação recebem energia do SIN e de usinas isoladas, onde compõe o total de energia utilizada. Esta é uma característica dos grandes consumidores de energia barra tentar baixar o custo médio da energia.

i.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Os fornos de redução ou cubas de redução eletrolítica são os maiores consumidores de energia elétrica, e seu consumo é o maior de todos os equipamentos de toda a cadeia produtiva do alumínio.

Nos fornos de redução eletrolítica se produz uma reação que ocorre entre o contato da alumina com a pasta de piche e coque (anodo) por meio de eletrólise. Quando é aplicada a energia elétrica numa tensão baixa na ordem de 5 volts e uma corrente bem alta na ordem de 125.000 amperes, faz com que a alumina e a pasta de piche e coque seja transformada em alumínio líquido.

Também é empregada energia elétrica em menor medida em força motriz, os motores empregados são na maioria de alto rendimento e seus acionamentos dependem especificamente de cada aplicação, sendo alguns com inversor de frequência e outros não.

Os principais consumidores de energia térmica são os fornos de fundição, responsáveis pela transformação do alumínio líquido para os lingotes, tarugos e outros, e no caso das plantas com tecnologia Prebake, os fornos para o cozimento dos anodos.

i.4) Indicadores energéticos

O consumo específico médio de energia elétrica está na ordem de 15.502 kWh por tonelada e o térmico na ordem de 0,134 tep.

Pode-se separar o consumo específico médio de energia elétrica, nesse caso em redução 14.772 kWh por tonelada e somente os serviços auxiliares em 729 kWh por tonelada.

Rendimento energético:

O conceito de rendimento energético se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo, e ele retrata a média dos rendimentos de transformação.

Serão apresentados maiores detalhes sobre a determinação dos rendimentos energéticos dos equipamentos em função da finalidade da utilização da energia, conforme apresentado abaixo. No caso do alumínio primário iremos trabalhar com a força eletromotriz, calor de processo, aquecimento direto, iluminação e eletroquímica.

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	0,00%	95,00%	72,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Vapor	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Metalúrgico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Lenha	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Produtos da Cana	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Primárias	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Diesel	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Combustível	0,00%	0,00%	90,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gasolina	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
GLP	0,00%	0,00%	85,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Querosene	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gases de Processo	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Coque de Carvão Mineral	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Eletricidade	93,90%	0,00%	0,00%	0,00%	37,00%	52,81%	0,00%
Carvão vegetal	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Álcool Etilico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Alcatrão	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 17: Indicadores de rendimento energético atuais, Subsegmento Alumínio Primário

Coeficientes de Destinação

O coeficiente de destinação é a distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem segundo aos seus usos. Neste caso do alumínio primário está dividida em força motriz, iluminação, aquecimento direto e eletroquímica, conforme tabela 18 abaixo:

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTES DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	0,0%	10,9%	89,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Carvão Vapor	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Carvão Metalúrgico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Lenha	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Produtos da Cana	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Primárias	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Diesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Combustível	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Gasolina	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
GLP	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Querosene	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gases de Processo	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Coque de Carvão Mineral	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Eletricidade	4,70%	0,0%	0,0%	0,0%	0,003%	95,3%	0,0%	100,0%
Carvão vegetal	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Álcool Etilico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Alcatrão	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 18. Coeficientes de destinação atuais, Subsegmento Alumínio Primário

i.5) Investimento necessárias para reposição de equipamentos

Abaixo segue a lista de reposição para os equipamentos atuais:

EQUIPAMENTO	CUSTO
Lâmpada Vapor de Sódio(200 W)	R\$ 22,00
Lâmpada Vapor de Sódio(400 W)	R\$ 46,90
Motores Alto Rendimento (5 CV)	R\$ 1.551,34
Motores Alto Rendimento (50 CV)	R\$ 11.189,75
Motores Alto Rendimento (75 CV)	R\$ 17.452,57
Motores Alto Rendimento (100 CV)	R\$ 20.485,34
Cubas Eletrolíticas (unidade)	R\$ 1.000.000,00
Compressor a Ar com Inversor de Frequência (290 kW)	R\$ 300.000,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017

Tabela 19. Investimento para reposição de equipamentos com a mesma eficiência

ii. Condições com tecnologias mais eficientes

ii.1) Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

Com base nas visitas e estudos das tecnologias mais eficientes, a grande mudança seria no tipo de processo empregado, pois o mais eficiente e atual é o **processo Prebake** (anodos pré-cozidos), ficando o mesmo volume de produção, fluxo de processo e equipamentos utilizados. Como já foi falado anteriormente a diferença entre os processos está no tipo de anodo empregado.

Os anodos seriam construídos e cozidos juntamente com a pasta (piche e coque), formando somente uma peça. Isso propicia uma menor emissão de gases dentro das salas, pois existe um enclausuramento dos fornos e uma eficiência de corrente da ordem de 93-94% versus 90-91% do processo Söderberg.

Também se conta com uma série de tecnologias que poderiam melhorar significativamente as atuais células de redução de alumina em alumínio em operação e baixar o consumo de energia elétrica. Essas opções estão voltadas principalmente para a melhoria da eficiência da célula atual (ou seja, aproximar o espaçamento ânodo-cátodo) e a redução das perdas de calor. As opções incluem materiais de melhor condutividade para o ânodo, revestimento do chão, aumento do isolamento dos fornos, controles avançados, melhor concepção dos componentes elétricos e melhorias no banho químico. Outras tecnologias melhoradas incluem modelagem, controle do processo por redes neurais, sensores contínuos e análise do sinal de tensão.

Além de melhorias no consumo de energia, a **modernização tecnológica da célula existente** (aproximar o espaçamento ânodo-cátodo, redução das perdas de calor, aumento do isolamento dos fornos, controles avançados, melhor concepção dos componentes elétricos e melhorias no banho químico, controle do processo por redes neurais, sensores contínuos e análise do sinal de tensão e diminuir os custos de substituição do ânodo) também pode reduzir significativamente os custos de produção

(através do aumento da produtividade em até 30%) e diminuir os custos de substituição do ânodo.

Deverão ocorrer mudanças de motores standard para **motores de alto rendimento** e até de alto rendimento para um com rendimento superior.

Recomenda-se também a troca de tecnologia na iluminação por lâmpadas de **LED**, e o acionamento do sistema de ar comprimido com **inversor de frequência**.

ii.2) Fontes de energia

Mesmo utilizando tecnologias mais eficientes no processo de produção do alumínio primário, as fontes de energia permanecerão as mesmas, sendo a energia elétrica utilizada em maior parte para eletroquímica na redução eletrolítica do alumínio, e em menor medida em força motriz e iluminação, e a energia térmica (gás natural) nos fornos da fundição e caldeiras, e o GLP para não deixar o alumínio líquido perder calor até chegar na fundição.

ii.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Os maiores consumidores de energia continuaram a ser os fornos de redução eletrolítica, que com a nova mudança de tecnologia serão cubas eletrolíticas de anodos pré-cozidos.

Outros grandes consumidores de energia são os fornos de fundição e as caldeiras para o aquecimento do fluido térmico para a produção dos anodos nas salas pasta.

ii.4) Indicadores energéticos

O consumo específico médio de energia elétrica está em 15.488 kWh por tonelada e o térmico está na ordem de 1,340tep/tonelada.

Pode-se separar o consumo específico médio de energia elétrica, nesse caso em redução 14.772 kWh por tonelada e somente os serviços auxiliares em 716 kWh por tonelada.

Rendimento energético

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	0,00%	95,00%	75,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Vapor	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Carvão Metalúrgico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Lenha	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Produtos da Cana	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Primárias	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Diesel	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo Combustível	0,00%	0,00%	90,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gasolina	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
GLP	0,00%	0,00%	85,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Querosene	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gases de Processo	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Coque de Carvão Mineral	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Eleticidade	95,50%	0,00%	0,00%	0,00%	85,00%	52,81%	0,00%
Carvão vegetal	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Álcool Etílico	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Alcatrão	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaboração própria com dados de Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017

Tabela 20. Indicadores de rendimento energético condição alternativa, Subsegmento A. Primário.

Coeficientes de Destinação

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTES DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	0,0%	11,1%	88,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Carvão Vapor	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Carvão Metalúrgico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Lenha	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Produtos da Cana	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Primárias	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Diesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Combustível	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Gasolina	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
GLP	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Querosene	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gases de Processo	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Coque de Carvão Mineral	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Eleticidade	4,62%	0,0%	0,0%	0,0%	0,002%	95,4%	0,0%	100,0%
Carvão vegetal	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Álcool Etílico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Alcatrão	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 21. Coeficientes de destinação da situação com tecnologias mais eficientes, Subsegmento Alumínio Primário

ii.5) Investimentos necessários para reposição de equipamentos de tecnologia mais eficiente

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objeto desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos, portanto, foi realizada uma

amostragem com base 2017 de alguns equipamentos e seus preços, em reais e sem o transporte, pois esse difere de região para região, são:

EQUIPAMENTO	CUSTO
High Bay LED Industrial(200 W)	R\$ 499,00
High Bay LED Industrial (400 W)	R\$ 1.060,00
Motores Alto Rendimento (5 CV)	R\$ 1.551,34
Motores Alto Rendimento (50 CV)	R\$ 11.189,75
Motores Alto Rendimento (75 CV)	R\$ 17.452,57
Motores Alto Rendimento (100 CV)	R\$ 20.485,34
Compressor a Ar com Inversor de Frequência (290 kW)	R\$ 300.000,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017

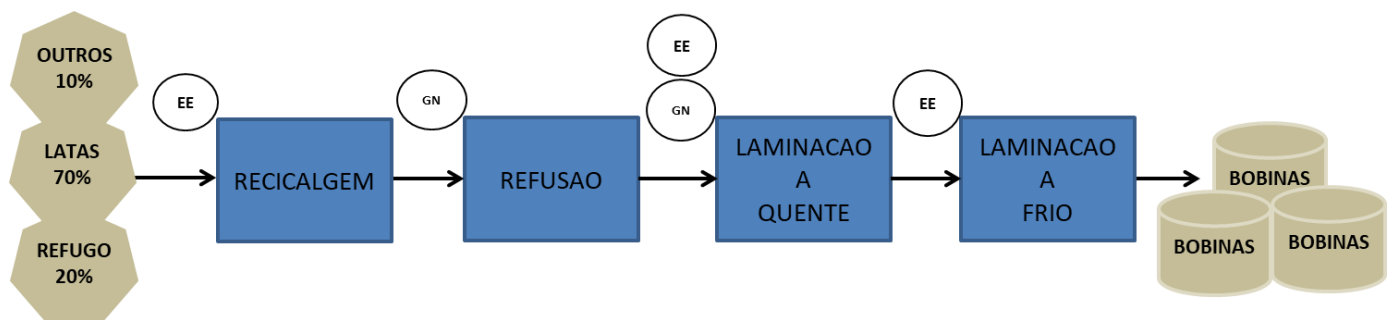
Tabela 22. Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência

d. Subsegmento Alumínio Secundário

i. Situação atual

i.1) Produção etapas de processo e equipamentos utilizados

O processo de produção do alumínio secundário inicia-se com a entrada do material passando pela área de reciclagem (70% latas, 20% refugo de alumínio e 10% outros), onde o material é picotado e encaminhado para os fornos de refusão onde se funde em alumínio líquido. O alumínio líquido segue para a formação das placas que depois seguem para a etapa de laminação a quente e depois a frio, resultando nas bobinas, conforme mostrado na figura 13 abaixo.



Fonte: Elaboração própria

Figura 13: Fluxograma de processo de produção de alumínio secundário simplificado

No processo de reciclagem utilizam-se os seguintes equipamentos: Desenfardadores mecânicos, separadores magnéticos, moinhos de martelos para picotar, sistema de exaustão, fornos revérberos e laminadores.

i.2) Fontes de energia

O processo de produção do alumínio secundário utiliza a energia elétrica na alimentação da força motriz e o sistema de iluminação, e a energia térmica no aquecimento direto dos fornos e na laminação a quente.

i.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Observa-se que o maior consumo de energia está na energia térmica, com um grande consumo de gás natural. Portanto os maiores consumidores de energia são os equipamentos que utilizam energia térmica, neste caso os fornos sidewell ou revérberos para fundição.

O consumo de energia elétrica é relativamente pequeno em comparação com o consumo de gás natural e é empregado em força motriz e iluminação.

Os motores empregados são na maioria de alto rendimento, sendo os motores do laminador à quente e a frio os de maior potência. O sistema de exaustão de ar é muito

importante, pois retira toda a sujeira da área de reciclagem e dos fornos, consumindo energia elétrica.

i.4) Indicadores energéticos

O consumo específico energia elétrica total da planta está em 816 kWh /tonelada, podendo ser dividido em 35 kWh/tonelada na etapa de reciclagem e 781 kWh/tonelada na etapa de refusão. O consumo específico de gás natural está em 168 Nm³/tonelada.

Rendimento energético:

O conceito de rendimento energético se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo, e ele retrata a média dos rendimentos de transformação.

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	0,0%	0,0%	76,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Carvão Vapor	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Carvão Metalúrgico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Lenha	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Produtos da Cana	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Primárias	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Diesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Combustível	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gasolina	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
GLP	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Querosene	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gases de Processo	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Coque de Carvão Mineral	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Eleticidade	93,9%	0,0%	0,0%	0,0%	37,0%	0,0%	0,0%
Carvão vegetal	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Álcool Etilico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Alcatrão	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 23: Indicadores de rendimento energético atuais, Subsegmento Alumínio Secundário

Coefficientes de Destinação

O coeficiente de destinação é a distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem, no caso do subsegmento de alumínio secundário utiliza-se a energia elétrica em força motriz e iluminação, e a energia térmica em calor de processo, conforme tabela 24 abaixo:

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTES DE DESTINAÇÃO (%)							
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	Total
Gás Natural	0,0%	0,0%	100,00%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Carvão Vapor	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Carvão Metalúrgico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Lenha	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Produtos da Cana	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Primárias	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Diesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Combustível	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gasolina	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
GLP	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Querosene	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gases de Processo	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Coque de Carvão Mineral	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Eleticidade	99,91%	0,0%	0,0%	0,0%	0,09%	0,0%	0,0%	100,0%
Carvão vegetal	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Álcool Etílico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Alcatrão	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 24: Coeficientes de destinação atuais, Subsegmento Alumínio Secundário

i.5) Investimentos necessários para reposição de equipamentos

Para todos os motores a serem substituídos a partir de 2015, já vem com um rendimento maior, na faixa de 95,5%.

Para os fornos, não existe uma substituição, mas sim a manutenção nos queimadores, refratários, portas e etc., que não são considerados como trocas de equipamentos.

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objeto desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos, portanto, realizamos uma amostragem com base 2017 de alguns equipamentos e seus preços, em reais e sem o transporte, pois esse difere de região para região, são:

EQUIPAMENTO	CUSTO
Lâmpada Vapor de Sódio(200 W)	R\$ 22,00
Lâmpada Vapor de Sódio(400 W)	R\$ 46,90
Motores Alto Rendimento (5 CV)	R\$ 1.551,34
Motores Alto Rendimento (50 CV)	R\$ 11.189,75
Motores Alto Rendimento (75 CV)	R\$ 17.452,57
Motores Alto Rendimento (100 CV)	R\$ 20.485,34
Compressor de Ar (250 kW)	R\$ 127.000,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017

Tabela 25: Investimento para reposição de equipamentos com a mesma eficiência

ii. Tecnologias mais eficientes

ii.1) Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

Com base na visita e nos estudos realizados não haverá alteração tanto na produção e etapas de processo, a planta ficará com o mesmo fluxo de processo e produção.

Como já foi observado no item anterior, o maior consumo de energia se produz nos fornos de refusão, portanto as primeiras medidas de eficiência energética a serem consideradas serão medidas para um melhor aproveitamento da energia térmica nos fornos de refusão.

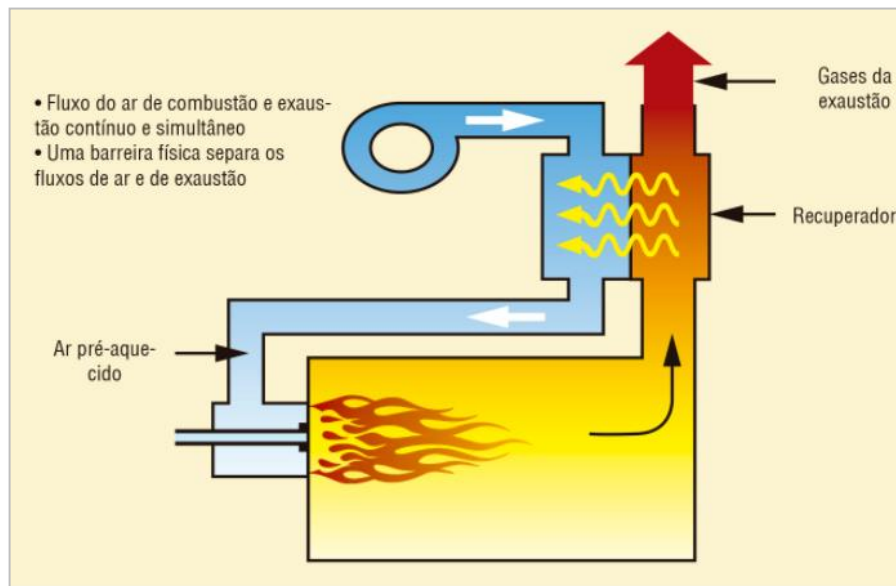
Uma medida recomendável seria utilizar a **combustão enriquecida com oxigênio**, que aumenta a taxa de transferência de calor, deixando as temperaturas de chama mais elevadas e assim aumenta a produtividade melhorando a eficiência energética em relação aos queimadores ar combustível. Para a aplicação desta medida é preciso incorporar queimadores de oxigênio aos fornos revérberos.

Essa oportunidade foi extraída dos projetos estudados pelo DOE (departamento de energia americano) para as indústrias energointensivas e tecnologias de amplo uso na indústria.

O enriquecimento de zonas de combustão com oxigênio pode fornecer um aumento no desempenho de aquecimento de um forno ou zonas do forno. Mesmo o enriquecimento de baixo nível em sistemas ar-combustível pode aumentar a transferência de calor, permitindo maiores rendimentos e redução no consumo específico de combustível.

Outra melhoria de eficiência energética seria **recuperar o calor do gás de combustão** para aquecer a sucata. Alguns fornos têm essa capacidade embutida, enquanto outros podem exigir adaptações. O gás de combustão passa por dentro de uma chaminé acima do reservatório de carga e aquece a sucata à medida que ele desce. Outra vantagem é a redução de perdas de calor por radiação na superfície do reservatório.

Esta técnica pode não ser viável quando se funde sucata mais fina. Como uma alternativa, o gás de combustão pode ser utilizado para aquecer o ar da combustão. Uma forma é instalar um recuperador na chaminé, o que poderia levar o ar do queimador a 600°C como é mostrado na figura 15 abaixo. Temperaturas ainda mais elevadas são possíveis utilizando queimadores com um recuperador interno.



Fonte: Boiler Company 2015

Figura 14: Recuperação do calor a partir do gás da chaminé para pré-aquecer o gás da combustão

Para o aumento da eficiência energética de eletricidade, as medidas propostas serão a utilização de motores de alto rendimento, o uso de inversores de frequência e a mudança da tecnologia de iluminação por lâmpadas de LED. Estas medidas já foram apresentadas no ponto 5.a.ii.1).

ii.2) Fontes de energia

Mesmo utilizando tecnologias mais eficientes o processo de produção do secundário irá utilizar energia elétrica empregada em força motriz e no sistema de iluminação, e gás natural mais o oxigênio na combustão dos fornos de refusão.

ii.3) Principais equipamentos consumidores de energia

Os fornos de refusão continuarão sendo os principais consumidores de energia a usar o gás natural, mas agora com um complemento de oxigênio para a melhora da combustão.

Como a planta já utiliza os motores de alto rendimento deverá continuar sua utilização, mas agora com um rendimento maior dos que estão instalados.

ii.4) Indicadores energéticos

Em função da troca da tecnologia no sistema de iluminação, a utilização de motores com rendimento melhor de 95,5% e a utilização de queimadores com oxigênio, melhorando o desempenho energético da planta, o consumo específico energia elétrica total da planta está em 802 kWh /tonelada, podendo ser dividido em 34 kWh/tonelada na etapa de reciclagem e 768 kWh/tonelada na etapa de refusão. O consumo específico de gás natural está em 163 Nm³/tonelada.

Rendimento energético

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	0,0%	0,0%	79,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Carvão Vapor	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Carvão Metalúrgico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Lenha	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Produtos da Cana	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Primárias	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Diesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Combustível	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gasolina	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
GLP	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Querosene	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gases de Processo	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Coque de Carvão Mineral	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Eleticidade	95,5%	0,0%	0,0%	0,0%	85,0%	0,0%	0,0%
Carvão vegetal	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Álcool Etílico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Alcatrão	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Elaboração própria com dados de Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017

Tabela 26: Indicadores de rendimento energético na situação com tecnologias mais eficientes, Subsegmento Alumínio Secundário

Coeficientes de Destinação

O coeficiente de destinação é a distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem, no caso do subsegmento de alumínio secundário utiliza-se a energia elétrica em força motriz e iluminação, e a energia térmica em calor de processo, conforme tabela 27 abaixo:

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTES DE DESTINAÇÃO (%)							Total
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras	
Gás Natural	0,0%	0,0%	100,00%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Carvão Vapor	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Carvão Metalúrgico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Lenha	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Produtos da Cana	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Primárias	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Diesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Combustível	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gasolina	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
GLP	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Querosene	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gases de Processo	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Coque de Carvão Mineral	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Eleticidade	99,95%	0,0%	0,0%	0,0%	0,05%	0,0%	0,0%	100,0%
Carvão vegetal	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Álcool Etílico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outras Fontes Secundárias de Petróleo (inclui coque de petróleo)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Alcatrão	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 27: Coeficientes de Destinação na situação com tecnologias mais eficientes, Subsegmento Alumínio Secundário

ii.5) Investimentos necessários para reposição de equipamentos de tecnologia mais eficiente

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objetivo desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos, portanto, foi realizada uma amostragem de alguns equipamentos e seus preços em reais, ano base 2017, e sem o transporte, pois esse difere de região para região, são:

EQUIPAMENTO	CUSTO
High Bay LED Industrial(200 W)	R\$ 499,00
High Bay LED Industrial (400 W)	R\$ 1.060,00
Motores Alto Rendimento (5 CV)	R\$ 1.551,34
Motores Alto Rendimento (50 CV)	R\$ 11.189,75
Motores Alto Rendimento (75 CV)	R\$ 17.452,57
Motores Alto Rendimento (100 CV)	R\$ 20.485,34
Compressor a Ar com Inversor de Frequência (160 kW)	R\$ 220.000,00
Queimadores com Oxigênio	Contrato de performance*

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017

* Queimadores de Oxigênio: As empresas não vendem esse sistema, elas fazem as adequações dos queimadores, instalam os tanques de Oxigênio e o vendem para os consumidores. Eles vendem o Oxigênio utilizado com base na economia global do sistema de queima, que reduz o consumo de gás natural.

Tabela 28: Investimento para reposição de equipamentos com a maior eficiência

6. ANÁLISE DE CONDICIONANTES À PENETREÇÃO DE TECNOLOGIAS EFICIENTES DE ENERGIA POR SUBSEGMENTO.

Entende-se como condicionante algo que condiciona ou restringe a aplicação das medidas de eficiência energética propostas, sendo muito importante a sua avaliação antes de iniciar o plano de implementação destas medidas. Neste estudo irão ser avaliados os condicionantes técnicos, econômico-financeiros, e outros condicionantes adicionais para cada subsegmento.

a. Subsegmento Bauxita

i. Condicionantes Técnicos

As medidas de eficiência energética que são consideradas no subsegmento de bauxita são a adequação da potência do motor à carga, o uso de acionadores e o uso de motores de alto rendimento, além da troca da tecnologia utilizada para iluminação pelas lâmpadas de LED.

No caso da aplicação de **motores de alto rendimento** no subsegmento de bauxita, cabe ressaltar que o consumo de energia elétrica da força motriz representa de 90% a 95% do total de energia elétrica consumida, portanto sua utilização é fundamental para a economia e a eficiência energética.

Ano	Rendimento
1960	88,0%
1970	88,7%
1980	90,0%
1990	90,2%
2000	93,9%
2010	95,2%
2013	95,5%

Fonte: Evoluções Tecnológicas dos Motores Eléctricos. Eficiência Energética de um Sistema. Soluções, Carlos Costa, WEG, 2013

Tabela 29: Rendimentos de motores elétricos de indução.

Ao falar do subsegmento da bauxita no Brasil como um todo, para as empresas que ainda não estejam operando com motores de alto rendimento, pode se falar que a substituição de um motor tradicional por um IR-3, primeiro nível acima do rendimento mínimo, pode propiciar ganhos de 6% de eficiência, uma grande diferença em um momento de margens apertadas. Já as práticas recorrentes, como o rebobinamento, que é adotado por empresas que não têm condições de adquirir motor novo após a queima do motor existente, podem provocar redução do rendimento de 1% a 5%.

A aplicação de **inversores de frequência**, no caso do setor de bauxita, se dará em:

- Bombas variação de vazão de líquidos;
- Sistemas de transporte: variação da velocidade de transporte;
- Sistemas de dosagem: variação da velocidade de alimentação;
- Sistema de ar comprimido.

A avaliação da eficiência energética do sistema, considerando a hipótese de otimização com inversores de frequência, em face de outras soluções de eficiência energética, poderá ser conseguida com a simulação numérica mediante ferramentas de cálculo específicas. Deverá ser realizado um estudo para cada equipamento.

É importante não esquecer que, se por um lado os inversores de frequência podem trazer grande economia e flexibilidade no controle dos motores elétricos, por outro, como modificam as formas de onda de tensão e corrente, são introduzidos harmônicos no sistema elétrico. Esses harmônicos podem provocar: maiores perdas por aquecimento nos equipamentos, torques oscilatórios, ressonâncias elétricas com consequentes sobretensões ou sobre correntes, interferências eletromagnéticas, além de picos, corte ou flutuações de tensão na rede elétrica, mas mesmo assim são grandes aliados para a eficiência energética.

Em relação à troca das lâmpadas de vapor de sódio pelas lâmpadas de **LED**, as maiores vantagens estão na sua longa vida útil e no seu baixo consumo de energia elétrica. Levando em conta a planta de bauxita visitada, existe uma potência de redução do consumo de energia elétrica consumida em iluminação na ordem de 60% e uma vida útil bem superior as de vapor de sódio, sem contar no baixo custo de manutenção.

Será necessária uma modificação na instalação, de maneira a adequar as novas luminárias LED.

O uso do LED requer cuidados para que suas vantagens sejam garantidas. Um bom projeto demanda atenção quanto a aspectos de dissipação de calor, lentes de conversão, fonte de alimentação (drivers) e circuitos eletrônicos (dimmer).

De acordo com as tecnologias disponíveis no mercado, podemos afirmar que para o segmento de bauxita, utilizando os equipamentos mais eficientes tais como motores de alto rendimento, variadores de velocidade e lâmpadas a LED, o consumo energético se verá reduzido, se comparado com o que temos atualmente, como podemos verificar na tabela 30 abaixo, onde mostram-se os impactos dessas tecnologias.

Tecnologia	Maturidade da tecnologia	Redução do consumo de energia	Redução do consumo de água	Redução da geração de resíduos	Redução da emissão de GEEs	Aumento da competitividade
Tecnologia de LEDs	Nova					
Motor elétrico de alto rendimento	Comercial					
Sistemas de iluminação	Comercial					
AVAs	Comercial					
Tecnologia de membranas	Nova					
Membranas líquidas	Piloto					
Equipamentos de HVAC	Nova/Comercial					

Legenda: magnitude do impacto Alto Médio Baixo Não se aplica

Fonte: CNI/PROCEL/Eletronbras. (s.d.)

*AVAs: Acionadores de Velocidade Ajustável

*HVAC: HVAC - heating, ventilation, and air-conditioning equipment

Tabela 30: Matriz de Tecnologias Inovadoras de Uso Geral. Magnitude dos Impactos sobre o processo produtivo.

ii. Condicionantes econômico-financeiros.

Tendo em conta o ciclo de vida útil de um motor, é possível constatar que os custos de operação acabam por se tornar muito superiores aos custos iniciais de aquisição e instalação. É exatamente por esta razão que os motores de alto rendimento representam uma ótima alternativa.

A tabela 30 da matriz de tecnologias inovadoras de uso geral mostra que os motores de alto rendimento e o inversor de frequência já estão bem consolidados no mercado brasileiro e mundial. Seus custos já são praticados como um preço de mercado mesmo absorvido na cultura da indústria e nos projetos em geral, pois não se comercializam mais motores sem ser de alto rendimento.

Hoje, as indústrias que desejarem modernizar os motores instalados em suas linhas de montagem têm à disposição recursos competitivos de várias fontes para esse fim. Empreendedores têm à sua mão soluções desenhadas com consultorias de energia, empresas de eficiência energética, linhas de crédito do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) ou chamadas públicas de distribuidoras de energia. Por sua vez, os fabricantes de máquinas mantêm planos de troca de motores elétricos, nos quais concedem desconto de até 12% no valor de aquisição do novo motor na entrega do equipamento antigo.

Os principais fatores econômicos que devem ser considerados numa hipotética situação de substituição de um motor standard por um de alto rendimento, são os seguintes:

- **Custo da energia:** O custo do kWh, em geral, varia conforme o tipo de consumidor e concessionária, e é muito importante para saber se vale a pena investir num novo motor ou não. Também pode variar em função do tipo de contrato entre consumidor e concessionária.
- **Taxas e juros:** É indispensável conhecer as taxas em vigor, de modo a que possa proceder a uma análise econômica eficiente.
- **Vida útil do motor:** Uma vez que a possível economia que o motor de alto rendimento irá proporcionar ocorrerá ao longo da sua vida útil, torna-se necessário estimar qual a vida útil do motor.

As lâmpadas de LED têm ainda seu custo elevado, mas ao longo do tempo acabam saindo em conta, pois geram um ganho energético de aproximadamente 60%, comparada com as lâmpadas de vapor de sódio, as quais são largamente utilizadas no setor de bauxita. Essa economia de energia permite a amortização das lâmpadas em um período relativamente curto.

No caso dos inversores de frequência da mesma maneira que no caso dos LED, devem ser feitos estudos técnicos/financeiros, avaliando o potencial de economia versus seu custo.

O investimento realizado na troca dessas tecnologias, (motores de alto rendimento, inversores de frequência e lâmpadas LED), apresentadas ao longo do estudo, é amortizado pela energia economizada, onde um fluxo de caixa deverá mostrar essa equação onde poderemos verificar em quanto tempo se paga a troca de tecnologia.

Para os novos projetos é muito importante que as empresas de engenharia já desenvolvam seus projetos utilizando esses tipos de equipamentos mais eficientes, demonstrando seus ganhos aos clientes.

iii. Outros condicionantes.

Um grande condicionante está nas pessoas que operam os equipamentos e tomam conta das plantas industriais. Deve-se visar pela formação e contratação de profissionais capacitados na questão de energia, pois eles podem atuar tanto em projetos, garantindo que as tecnologias mais eficientes sejam utilizadas, quanto na operação também, auxiliando no uso dessas tecnologias.

Uma alternativa muito boa para essa consciência de eficiência energética e o emprego da ABNT NBR ISO 50.001 – Sistemas de Gestão de Energia, que demonstra o mínimo necessário para ter um consumo energético eficiente.

b. Subsegmento Alumina.

i. Condicionantes Técnicos.

As medidas de eficiência energética consideradas no subsegmento de alumina são, para a melhoria da eficiência térmica: a utilização de economizadores nas caldeiras, a instalação de alta pressão com cogeração de energia, além das medidas de gestão anteriormente explicadas, e para a melhora a eficiência elétrica: o uso de variadores de frequência no sistema de ar comprimido, o uso de motores de alto rendimento e a troca da tecnologia utilizada para iluminação pelas lâmpadas de LED.

Quanto à medida de **utilização de economizadores** pode-se salientar que é uma medida muito antiga, as primeiras caldeiras de vapor já tinham economizadores. Ao longo do tempo os investimentos para a fabricação dos economizadores têm diminuído por causa do avanço da tecnologia tanto dos materiais utilizados quanto do processo de fabricação. Portanto, pode-se afirmar que é reduzido o número de instalações que não possuem economizador instalado nas suas caldeiras. Sendo assim nas caldeiras que não possuem economizador, a instalação do mesmo pode gerar uma melhora de rendimento de até o 3,5%.

Para a aplicação de **caldeiras de alta pressão com cogeração** precisa-se dos seguintes equipamentos:

- uma caldeira industrial;
- uma turbina com redutor;
- um conjunto gerador.

Diversas empresas que utilizam o vapor para o seu processo industrial, buscam uma caldeira que atenda seu processo, que geralmente são pressões baixas, numa faixa de 5 a 10 bar.

As caldeiras de alta pressão são sempre utilizadas com uma cogeração, e a turbina fica responsável por baixar a pressão da caldeira para a pressão de processo, assim gerando a energia elétrica para o processo produtivo.

Para os novos projetos é muito importante que as empresas de engenharia já desenvolvam seus projetos utilizando esses tipos de equipamentos mais eficientes, demonstrando seus ganhos aos clientes.

ii. Condicionantes econômico-financeiros.

As caldeiras deverão já vir com os **economizadores** projetados e instalados, permitindo o preaquecimento da água e assim deixando o sistema mais eficiente, esta tecnologia está bem consolidada no mercado e seus custos já estão incorporados ao preço de mercado das caldeiras.

O sistema de caldeira de alta pressão com a cogeração gera resultados como o custo evitado da energia elétrica no mercado, mais o transporte de energia e a garantia de seu fornecimento que devem ser avaliados durante a análise econômica.

As **caldeiras de alta pressão com cogeração** têm um alto custo de implementação e deverá ser feita uma análise de cada caso em particular, a análise do fluxo de caixa irá mostrar a viabilidade ou não desse sistema.

Para que seja viável a implantação de cogeração em uma indústria, é necessário que:

- A indústria seja consumidora das diferentes formas de energia cogerada (energia mecânica ou elétrica e de calor ou frio);
- O custo da energia gerada seja inferior à soma dos insumos energéticos adquiridos (energia elétrica mais combustível);
- Existam garantias de suprimento de combustível;
- Não ocorram restrições ambientais à implantação do empreendimento.

iii. Outros condicionantes.

Um grande condicionante está nas pessoas que operam os equipamentos e tomam conta das plantas industriais. Deve-se visar pela formação e contratação de profissionais capacitados na questão de energia, pois eles podem atuar tanto em projetos, garantindo que as tecnologias mais eficientes sejam utilizadas, quanto na operação também, auxiliando no uso dessas tecnologias.

Uma alternativa muito boa para essa consciência de eficiência energética é o emprego da ABNT NBR ISO 50.001 – Sistemas de Gestão de Energia, que demonstra o mínimo necessário para ter um consumo energético eficiente.

c. Subsegmento Alumínio Primário.

i. Condicionantes Técnicos.

A eficiência de transformação de corrente do processo Prebake (93% a 94%) é melhor do que o processo Sonderberg (91% a 92%), em função da utilização do anodo pre-cozido. Uma outra vantagem está relacionada a emissão de gases (gás carbônico (CO₂) e os perfluorcarbonetos (PFCs)), pois como o cozimento dos anodos já aconteceu, a emissão de gases é muito baixa e ainda existe um enclausuramento das cubas.

As mais novas plantas de alumínio primário usam uma variação da tecnologia de ânodos pré-cozidos chamada Centre Worked Pre-bake Technology (CWPB). Esta tecnologia usa múltiplos pontos de alimentação e outros controles computadorizados para uma alimentação precisa da alumina. Uma característica chave das plantas de CWPB é o enclausuramento do processo. As emissões fugitivas dessas células são muito baixas, menos que 2% das emissões geradas. O saldo das emissões é coletado na própria célula e arrastado por um sistema muito eficiente de arraste, que remove partículas e gases. O processo é controlado por computador até os mínimos detalhes, ou seja, a ocorrência do efeito ânodo – condição que causa produção de pequenas quantidades de perfluorcarbonos (PFCs) – é minimizada.

O cozimento dos anodos juntamente com a pasta (piche e coque), num único bloco, propicia um melhor rendimento da reação eletroquímica nos fornos de redução e o enclausuramento das cubas reduz as emissões de gases nas salas.

Hoje em dia todos os novos projetos de alumínio primário utilizam a tecnologia Pre-bake.

Existem pesquisas para desenvolvimento rotas tecnológicas alternativas ao processo de Hall-Héroult que consumiriam uma quantidade de energia elétrica inferior ao processo convencional reduzindo, portanto, as emissões dessa categoria (como o gás carbônico (CO₂) e os perfluorcarbonetos (PFCs)). Essas alternativas ainda são hipóteses teóricas ou em fase de pesquisa e prototipagem, longe de estarem viáveis em nível de mercado. Exemplos de rotas alternativas são: redução carbotérmica, tecnologia de célula drenada (Drained-Cell Technology), eletrólise multipolar, dentre outros. O desenvolvimento de algumas tecnologias está mais avançado do que outras, porém o horizonte temporal para viabilizá-las está na ordem de décadas no futuro.

ii. Condicionantes econômico-financeiros.

O investimento para a mudança da tecnologia Söderberg pela Prebake, resulta numa troca de centenas de cubas eletrolíticas/fornos de redução e uma nova fábrica de anodos pré-cozidos resulta inviável economicamente.

A eficiência elétrica está atrelada à tecnologia utilizada nas células eletrolíticas. Reduzir a eficiência elétrica de uma planta em operação pode apresentar custos elevados, e eventualmente pode significar uma parada na produção.

A expansão da capacidade produtiva das plantas pode ser realizada de maneira a empregar uma tecnologia mais moderna do que aquela empregada na capacidade produtiva já instalada, gerando ganhos de eficiência de energia elétrica.

iii. Outros condicionantes.

Um grande condicionante está nas pessoas que operam os equipamentos e tomam conta das plantas industriais. Deve-se visar pela formação e contratação de profissionais capacitados na questão de energia, pois eles podem atuar tanto em projetos, garantindo que as tecnologias mais eficientes sejam utilizadas, quanto na operação também, auxiliando no uso dessas tecnologias.

Uma alternativa muito boa para essa consciência de eficiência energética é o emprego da ABNT NBR ISO 50.001 – Sistemas de Gestão de Energia, que demonstra o mínimo necessário para ter um consumo energético eficiente.

d. Subsegmento Alumínio Secundário.

i. Condicionantes Técnicos.

A **utilização do oxigênio nos queimadores** propicia um enriquecimento da mistura do gás natural, incrementando seu poder calorífico e assim uma maior temperatura no forno. Isso gera um aumento do rendimento no forno e uma redução do volume do gás natural, conforme indicado na figura 15 abaixo.

Setor Industrial	Programa	Melhorias
Alumínio	Combustão Enriquecida de Oxigênio	30% a mais na produtividade no forno e melhoria de 40% na eficiência energética se comparado com queimadores de ar-combustível

Fonte: CNI/PROCEL/Eletronbras. (s.d.).

Figura 16: Oportunidades de eficiência energética para a Indústria

Será necessário realizar uma avaliação de segurança junto ao forno, pois o oxigênio causar explosões se não for desenhado de maneira correta, tanto para o seu sistema de armazenamento, distribuição e queima no forno.

ii. Condicionantes econômico-financeiros.

Para a utilização do oxigênio nos fornos de refusão e necessário aplicar uma avaliação econômica bem detalhada, pois é uma medida que adiciona um custo adicional ao sistema, que e o do oxigênio, portanto essa análise tem que levar em consideração o resultado global (redução do gás natural e adição do oxigênio), assim avaliando o resultado.

iii. Outros condicionantes.

Um grande condicionante está nas pessoas que operam os equipamentos e tomam conta das plantas industriais. Deve-se visar pela formação e contratação de profissionais capacitados na questão de energia, pois eles podem atuar tanto em projetos, garantindo que as tecnologias mais eficientes sejam utilizadas, quanto na operação também, auxiliando no uso dessas tecnologias.

Uma alternativa muito boa para essa consciência de eficiência energética é o emprego da ABNT NBR ISO 50.001 – Sistemas de Gestão de Energia, que demonstra o mínimo necessário para ter um consumo energético eficiente.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com os dados levantados e estudados, existe um potencial de eficiência energética no setor de Alumínio brasileiro.

Existem oportunidades que permeiam todos os subsegmentos da cadeia do alumínio (bauxita, alumínio, primário e secundário), que são:

- Motores de alto rendimento;
- Inversores de frequência;
- Iluminação Led;
- Combustão enriquecida com oxigênio nos fornos de refusão;
- Economizadores nas caldeiras;
- Isolamento térmico;
- Tecnologia Prebake;
- Caldeiras de alta pressão com cogeração;
- Ações de gestão (6 Sigma);
- Profissionais capacitados.

Para algumas oportunidades os ganhos são compulsórios, como a troca de motores, pois os motores de hoje já tem uma eficiência da ordem de 95,5%.

Ter profissionais capacitados em energia nas plantas garante que alguém estará voltado para visar por um consumo mais eficiente dos energéticos, também irá garantir que os novos projetos já sejam planejados utilizando as tecnologias mais eficientes, mostrando seus ganhos.

8. REFERÊNCIAS UTILIZADAS

- ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. (s.d.). *Bauxita no Brasil – Mineração Responsável e Competitividade*. Acesso em 2017, disponível em ABAL - Associação Brasileira do Alumínio: <http://abal.org.br/publicacao/bauxita-no-brasil-mineracao-responsavel-e-competitividade/>
- ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. (s.d.). *Perfil da Indústria Brasileira do Alumínio*. Acesso em 2017, disponível em ABAL - Associação Brasileira do Alumínio: <http://abal.org.br/estatisticas/nacionais/perfil-da-industria/>
- ABAL- Associação Brasileira do Alumínio. (Março 2016). *O atual contexto da CFEM para a competitividade da indústria mineral*. Acesso em Setembro de 2017, disponível em ABAL- Associação Brasileira do Alumínio: <http://abal.org.br/>
- ABAL - Associação Brasileira do Alumínio e CNI – Confederação Nacional de Indústria (Brasília 2012) – *A sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio – Encontro da indústria para a sustentabilidade*
- Alan Rabelo de Souza Moura, Emílio Henrique Ferreira e Ferreira, Felipe Kiyoshi Fukushima, Teodoro Macedo Araújo Neto, Thalita Maria Pontes Moutinho, Thiago Valente da Costa (Belém, Maio de 2008) – *Processo de obtenção do Alumínio*. - Universidade federal do Pará
- Ar Brasil Compressores Ltda. *Catálogo compressores alta pressão 2017*, disponível em <http://www.arbrasilcompressores.com.br/pdf/comp-alta-pressao.pdf>
- Belmonte, R. (s.d.). *Ebah - Bauxita*. Acesso em 2017, disponível em Ebah: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAfKmkAI/bauxita?part=2>
- Boiler Company. (11 de Novembro de 2015). *Cogeração: Geração de energia elétrica através de vapor produzido em caldeiras*. Acesso em 2017, disponível em Boiler Company: <http://www.boilercompany.com/2015/11/11/cogerao-geracao-de-energia-eletrica-atraves-de-vapor-produzido-em-caldeiras/>
- Camargo, A. M. (05 de Junho de 2016). *Confiança no potencial de mercado do alumínio*. Acesso em 2017, disponível em Revista Alumínio: <http://www.revistaaluminio.com.br/gestao/3215/>
- Chicago Pneumatic. (s.d.). *Apresentação Técnica: Compressores Estacionários com Inversor de Frequência*. Acesso em 2017, disponível em Zenit Compressores: <http://www.zenitcompressores.com.br/downloads/catalogos-tecnicos/compressores-estacionarios-com-inversor-de-frequencia.pdf>
- CNI/PROCEL/Eletronbras. (s.d.). *Novas Tecnologias para Processos Industriais: Eficiência Energética na Indústria*. Acesso em 2017, disponível em Portal da Indústria: http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_24/2012/09/06/262/20121127180918714093e.pdf

CNI/PROCEL/Eletronbras. (s.d.). *Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria – Experiências Internacionais em Eficiência Energética para a Indústria*

Clayton Morales. (São Paulo 2007). *Indicadores de Consumo de Energia Elétrica como ferramentas de apoio à gestão: Classificação por prioridades de atuação na Universidade de São Paulo*

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. (Março de 2016). *Sumário Mineral 2015*. Acesso em 2017, disponível em DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL: <http://www.dnmp.gov.br/dnmp/sumarios/sumario-mineral-2015>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. (s.d.). *Alumínio. Geól. Raimundo Augusto Corrêa Mártires*. Disponível em DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL: <http://www.dnmp.gov.br/dnmp/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/4-1-aluminio>

Dj Fornos. (s.d.). *Forno Elétrico a Cadinho*. Acesso em 2017, disponível em Dj Fornos: <http://www.djfornos.com.br/forno-eletrico-cadinho>

Elektro - Eletricidade e Serviços S.A. (s.d.).- *Manuais Elektro de Eficiência Energética, Segmento Industrial. Geração de vapor e Calor*.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. (s.d.). *Balço Energético Nacional - 2016*.

EPE e MME. (s.d.). *Plano Decena de Expansão de Energia 2023*.

Exame. (09 de Novembro de 2015). *Brasil supera próprio recorde em reciclagem de alumínio*. Acesso em 2017, disponível em Exame: <http://exame.abril.com.br/economia/brasil-supera-proprio-recorde-em-reciclagem-de-aluminio/>

FG. Ferramentas Gerais LTDA. *Catálogo de lâmpadas disponível no site*: <http://www.fg.com.br/lampada-vapor-sodio-son-t-400w-48000lm-e40---osram/p?idsku=5322014>

Gil, J. L. (s.d.). PROCESO ELECTROLÍTICO DE OBTENCIÓN DEL ALUMINIO.

Guia ARPEL. (s.d.). *Índices de Energía en la industria de Petróleo y gas*.

HTL. Instalação e Manutenção Elétrica. *Tabelas de consumo/eficiência energética para consulta e download*. Disponível no site: <http://www.htlbrasil.com/downloads-tabelas-lampadas-led-e-outras-mais>

HYDRO. (s.d.). *Refino de Alumina*. Acesso em 2017, disponível em HYDRO - A Hydro no Brasil: <http://www.hydro.com/pt-BR/a-hydro-no-brasil/sobre-o-aluminio/ciclo-de-vida-do-aluminio/refino-da-alumina/>

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. (01 de Março de 2016). *O ATUAL CONTEXTO DA CFEM PARA A COMPETITIVIDADE DA INDÚSTRIA MINERAL*. Acesso em 2017, disponível em Portal da Mineração: <https://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2017/05/O-atual-contexto-da-CFEM.pdf>

- INCAL. (s.d.). *Economizador de caldeiras a vapor*. Acesso em 2017, disponível em INCAL: <http://www.incalconterma.com.br/economizador-de-caldeiras-a-vapor>
- International Aluminium Institute. (s.d.). *world-aluminium*. Acesso em 2017, disponível em World Aluminium - the website of the International Aluminium Institute: <http://www.world-aluminium.org/>
- International Energie Agency. (s.d.). *Indicadores de Eficiência Energética: Bases Essenciais para el Establecimiento de Políticas*. Acesso em 2017, disponível em International Energie Agency: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyEfficiencyVespagnol_epdf.pdf
- Latasa Reciclagem. (s.d.). *Processo de Reciclagem*. Acesso em 2017, disponível em Latasa Reciclagem: <http://www.latasa.ind.br/pt/institucional/processo-de-fabricacao>
- Leonardo Energy Brasil. (s.d.). *Troca de Motores como Indutora de Competitividade na Indústria Brasileira*. Acesso em 2017, disponível em Leonardo Energy Brasil: <http://leonardo-energy.org.br/noticias/troca-de-motores-como-indutora-de-competitividade-na-industria-brasileira/>
- MDIC - Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior , ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, GVces - Fundação Getúlio Vargas - Centro de Estudos em Sustentabilidade (s. d.) – *Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para economia de baixo carbono: Caderno 5. Nota técnica de alumínio*.
- MENENDEZ, E. (s.d.). LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO Y SUS REFRACTARIOS. *INITEC*.
- MME - Ministério de Minas e Energia. (s.d.) SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL – SGM http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P11_RT22_Perfil_da_Minerao_de_Bauxita.pdf/1713eb90-cbf9-42e5-a502-18abf47d9a1f
- MME - Ministério de Minas e Energia. (s.d.). *Balço de Energia Útil 2005*.
- Ms. Ing. Miriam C. Marín. (s.d.) – *Proceso de refinado de alumina de la bauxita*.
- Ober, J. A. (2016). *Mineral commodity summaries 2016*. Reston: U.S. Geological Survey.
- PROCEL. (2017). *Plano de Aplicação de Recursos*.
- PROCEL/Eletobras. (s.d.). *EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO USO DE VAPOR*. Revista Alumínio. (30 de Setembro de 2016). *Setores de alumina e bauxita crescem no País*. Acesso em 2017, disponível em Revista Alumínio: <http://www.revistaaluminio.com.br/mercado/vocacaoparacrescer/>
- PROCEL/ Eletobras. (março de 2016) - Superintendência de Eficiência Energética PF - *Dicas de economia de energia por setor de consumo*
- PROCEL/ Eletobras. (s.n.) e CNI - *Novas Tecnologias para Processos Industriais: Eficiência Energética na Indústria*

ReciclaBR (2015) – *2015 Anual report*

Recicloteca - <http://www.recicloteca.org.br/material-reciclavel/metal/aluminio> (acesso em 08/2017)

Revista Alumínio. (18 de Janeiro de 2017). *Perspectivas da indústria para 2017*. Acesso em 2017, disponível em Revista Alumínio: <http://www.revistaaluminio.com.br/mercado/preview-2017/>

Secretaria de Energia e Mineração . (s.d.). *Troca de motores como indutora de competitividade na indústria brasileira*. Acesso em 2017, disponível em Secretaria de Energia e Mineração - Governo do Estado de São Paulo: <http://www.energia.sp.gov.br/2017/04/troca-de-motores-como-indutora-de-competitividade-na-industria-brasileira/>

SINDIEXTRA - Sindicato da Indústria Mineral de Minas Gerais (2012). *Relatório não ferrosos*. Statista - El Portal de Estadísticas. (s.d.). *Reservas mundiales de bauxita por países 2016*. Acesso em 2017, disponível em Statista - El Portal de Estadísticas: <https://es.statista.com/estadisticas/600676/reservas-mundiales-de-bauxita-por-paises/>

USP. (2004/2005). *Tipos de Lâmpadas*. Acesso em 2017, disponível em edisciplinas.usp: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2589303/mod_resource/content/1/Fontes_Lumin%20%281%29.pdf

Valor Econômico. (11 de Setembro de 2015). *ELEVADO CUSTO DA ENERGIA AFETA CADEIA DO ALUMÍNIO*. Acesso em 2017, disponível em IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração: http://ibram.org.br/150/15001002.asp?ttCD_CHAVE=253115

WEG. *Calculadora de preços de motores disponível no site* <https://www.weg.net/see+/pages/regua.jsp>