

**GUILHERME DE ARAUJO CIRILO**

**INFLUÊNCIA DA CRISE HÍDRICA/ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE  
ALUMÍNIO**

**SÃO PAULO**

**2018**

GUILHERME DE ARAUJO CIRILO

INFLUÊNCIA DA CRISE HÍDRICA/ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE  
ALUMÍNIO

Trabalho de Formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro de  
Materiais.

Programa de Graduação do  
Departamento de Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais da Escola  
Politécnica da USP

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Franco  
de Monlevade

São Paulo  
2018

TF-2018

C 496 i

H-2018 X

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800009352

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Cirilo, Guilherme de Araujo****Influência da crise hídrica/energética na produção de alumínio / G. A. Cirilo. São Paulo, 2018. Número de páginas p. 67.****Trabalho de formatura – Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.****1.Alumínio 2. Crise hídrica 3. Crise energética 4. Alumínio Primário**

**CIRILO, GUILHERME.** Influência da Crise Hídrica-Energética na Produção de Alumínio. São Paulo, 2018. 67 p.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais Osvaldo Cirilo e Claudete Aparecida de Araujo Cirilo e à minha avó Paula Zevoli de Nobrega, que nunca mediram esforços para me apoiar ao longo desses anos. Sem eles nada do que eu vivi até aqui seria possível.

Agradeço ao professor Dr. Eduardo Franco de Monlevade, por todo apoio, orientação, paciência e boa vontade em me orientar nesse trabalho.

Agradeço à minha amiga Kátia Sobrinho Favorito, que todos os dias me lembrava que eu tinha um trabalho de formatura para entregar e em nenhum momento me deixou desistir e esquecer que o fim estava próximo.

E, por fim, agradeço aos meus amigos da vivência politécnica, vocês tornaram esses longos anos mais agradáveis e foram uma das partes mais importantes na conclusão dessa árdua missão.

"Nunca deixe que alguém te diga  
que não pode fazer algo. Nem  
mesmo eu. Se você tem um sonho,  
tem que protegê-lo. As pessoas  
que não podem fazer por si  
mesmas, dirão que você não  
consegue. Se quer alguma coisa,  
vá e lute por ela. Ponto final."  
- À Procura da Felicidade

## RESUMO

O alumínio pode ser dividido em primário e secundário: o primeiro é produzido a partir da mineração; o segundo, é o alumínio reciclado. O alumínio primário é originário da redução da alumina, extraída da bauxita. O Brasil possui o terceiro maior reservatório de bauxita do mundo e é um dos maiores produtores de alumínio primário. A produção deste tipo de alumínio é feita através de dois processos: o processo Bayer e o processo Hall-Heroult. O primeiro processo transforma a bauxita em alumina e o segundo reduz a alumina em alumínio primário. O processo Hall-Heroult possui um grande gasto de energia elétrica em sua produção. No Brasil, houve uma crise hídrica – afetando as usinas hidrelétricas – e uma crise energética nos anos de 2013 a 2015. Desta forma, é necessário saber como a produção de alumínio primário se comportou durante o período de crise. O objetivo deste trabalho foi verificar a influência das crises hídrica e energética na produção de alumínio primário. Dos resultados obtidos é possível concluir que o ano de 2014 foi o pior ano da produção de alumínio primário no Brasil como influência das crises. Neste ano, o Brasil deixou de ser, majoritariamente, exportador de alumínio para ser importador. Os preços do alumínio primário aumentaram e a produção abaixou. Entretanto, o Brasil possui uma grande riqueza natural para a produção de alumínio e o Governo brasileiro tem a necessidade de produzir alternativas para este setor.

Palavras chaves: Alumínio, Alumínio Primário, Crise Hídrica, Crise Energética, Hall-Heroult.

## ABSTRACT

The aluminum can be divided into primary and secondary: the former has a natural creation process; the later is the recycled aluminum. The primary aluminum is originated from the reduction of alumina, extracted from bauxite. Brazil has the third biggest bauxite reservoir in the world and is one of the largest producer of primary aluminum. The production of this kind of aluminum is made through two process: the Bayer process and the Hall-Heroult process. The Bayer process transform bauxite into alumina and the second reduces the alumina into aluminum. The Hall-Heroult process spendr a great amount of electric energy in the production. In Brazil, there was a hydric crisis – affecting the hydroelectric plants – and an energetic crisis in 2013 to 2015. Thus, it is needed to know how the primary aluminum production behaved during the crisis period. The main goal of this monography was verifying the influence of hydric and energetic crisis in the production of primary aluminum. From the collected results it was possible to conclude that the 2014 year was the worst year in the Brazilian primary aluminum production as influence by the crisis. In that year, Brazil left the state of major exporter to become an importer of aluminum in international market. Primary aluminum prices had risen and the production decreased. However, Brazil has a great natural richness to the production of primary aluminum and, thus, the Brazilian government needs to produce alternative strategies to this sector.

Key words: Aluminum, Primary Aluminum, Energetic Crisis, Hydric Crisis, Hall-Heroult.

## Índice de Figuras



Figura 1 - Ciclo do Alumínio. Imagem Retirada da Internet. ....	11
Figura 2 - Imagem representativa da bauxita. Retirada da Internet. ....	13
Figura 3 - Imagem representativa dos três estados que possuem exploração de bauxita. Retirada de <sup>(9)</sup> .....	14
Figura 4 - Processo Bayer para a purificação da bauxita e a extração da alumina <sup>(9)</sup> .....	15
Figura 5 - Imagem representativa de uma célula eletrolítica <sup>(16)</sup> .....	18
Figura 6 - Imagem do quadro representativo dos incidentes críticos <sup>(18)</sup> . 19	
Figura 7 – Custo de produção médio mundial de alumínio no primeiro trimestre de 2009. Retirada de <sup>(17)</sup> .....	21
Figura 8- Consumo médio específico de energia elétrica na produção de alumínio primário. Retirada do <sup>(17)</sup> .....	21
Figura 9 - Gasto de energia durante a produção de alumínio primário. Imagem modificada de <sup>(9)</sup> .....	22
Figura 10 - Imagem representativa dos componentes de um reservatório de água. Imagem retirada de <sup>(27)</sup> .....	24
Figura 11 - Produção Anual de Alumínio. Retirado de <sup>(9)</sup> .....	25
Figura 12 - Importação e Exportação de Alumínio Primário no Brasil de 2000 a 2015. Retirado de <sup>(9)</sup> .....	26
Figura 13 - Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Imagem retirada da internet. .	29
Figura 14- Usina Hidrelétrica de Furnas. Imagem retirada da internet. ...	30
Figura 15 - Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo. Imagem retirada da Internet. ....	31
Figura 16 - Usina Hidrelétrica de Itapararanga. Imagem retirada da internet. ....	32
Figura 17 - Usina Hidrelétrica de Paraibuna. Imagem retirada de <sup>(34)</sup> .....	33
Figura 18 - Usina Hidrelétrica Engenheiro Souza Costa (Jupia). Imagem retirada da internet. ....	34
Figura 19 - Dados Pluviométricos da cidade de Belém em relação à precipitação durante os 12 meses do ano.....	37
Figura 20 - Dados Pluviométricos da cidade de Machado em relação à precipitação durante os 12 meses do ano.....	38
Figura 21- Dados Pluviométricos da cidade de Pompeu em relação à precipitação durante os 12 meses do ano.....	39
Figura 22- Dados Pluviométricos da cidade de Sorocaba em relação à precipitação durante os 12 meses do ano.....	40
Figura 23- Dados Pluviométricos da cidade de Taubaté em relação à precipitação durante os 12 meses do ano.....	41
Figura 24- Dados Pluviométricos da cidade de Votuporanga em relação à precipitação durante os 12 meses do ano.....	43

Figura 25- Exportações e importações brasileiras de alumínio e seus produtos.	46
Figura 26 - Produção trimestral de alumínio por tonelada de 2002 a 2017.....	47
Figura 27- Peso da energia elétrica adquirida pela indústria no custo total de produção do alumínio primário, em (%) (54). ....	48
Figura 28- Preço Médio Nacional da Tarifa de Energia Elétrica. Retirado de (55).....	48
Figura 29- Preço do alumínio (por tonelada) de 2004 a 2007.....	49

## Índice de Tabelas

Tabela 1. Tabela comparativa da produção de Bauxita, Alumina e Alumínio entre os países mais produtores. ....	11
Tabela 2. Processo de digestão da bauxita <sup>(12)</sup> . ....	12

## Sumário

1	Introdução .....	8
2	Revisão Bibliográfica.....	10
2.1	Alumínio – Propriedades Físicas e Químicas .....	10
2.2.1.	Alumínio Primário .....	11
2.2	Bauxita .....	12
2.3	Processo Bayer.....	14
2.4	Processo Hall-Heroult .....	17
2.5	Matriz Energética Brasileira .....	18
2.6	O gasto de energia na produção do alumínio primário.....	20
2.7	A Crise Hídrica (2013-2015).....	23
2.8	A Crise Energética (2014-2015).....	24
3	Objetivos .....	27
4	Metodologia.....	28
4.1	Dados Pluviométricos.....	28
4.1.1	Belém .....	28
4.1.2	Machado .....	29
4.1.3	Pompeu.....	30
4.1.4	Sorocaba.....	31
4.1.5	Taubaté .....	32
4.1.6	Votuporanga.....	33
4.2	Dados de Energia e da Produção de Alumínio Primário .....	34
5	Resultados e Discussão.....	36
5.1	Análise dos Dados Pluviométricos .....	36
5.1.1	Belém .....	36
5.1.2	Machado .....	37
5.1.3	Pompeu.....	39
5.1.4	Sorocaba.....	40
5.1.5	Taubaté .....	41
5.1.6	Votuporanga.....	42
5.1.7	Discussão.....	43
5.2	Energia e Produção de Alumínio Primário .....	46
5.2.1	O cenário atual e o futuro do alumínio .....	49
6	Conclusão .....	51

7 Referências Bibliográficas.....	53
-----------------------------------	----

## 1 Introdução

O alumínio é o terceiro elemento químico mais abundante e o metal mais abundante na natureza, caracterizando 8% do peso total da superfície sólida do planeta Terra. Geralmente, está associado com outro tipo de material na natureza, como, por exemplo, a bauxita <sup>(1)</sup>.

Apesar da grande abundância, por não ser encontrado na forma pura, o alumínio precisa ser processado para atingir sua forma comercial. Esse metal possui uma gama de aplicações e é considerado um metal revolucionário da história recente <sup>(2)</sup>.

A produção comercial do alumínio possui uma história recente, com início em 1854, e vem dividindo dois lados: os entusiastas e os desapontados<sup>1</sup>. Os primeiros são aqueles que ficaram (e ainda ficam) entusiasmados com a revolução que o alumínio trouxe, i.e. com o progresso social que o alumínio proporciona. Já os desapontados consideram o alumínio como o metal do futuro, ainda nas sombras do aço, madeira e plástico <sup>(2)</sup>.

Pouco tempo depois, o alumínio passou a ter uma maior produção e o seu preço diminuiu consideravelmente, ainda que o alumínio não possuísse alto grau de pureza <sup>(3)</sup>. A primeira produção em larga escala foi feita após a criação, de modo independente, do processo Hall-Heroult (ver seção 2.5), pelos engenheiros Paul Héroult e Charles Martin Hall, que converte alumina em alumínio. Depois, a produção aumentou em larga escala ao ser relacionado com o processo Bayer (ver seção 2.4) que extrai a alumina da bauxita.

Atualmente, o alumínio ainda faz parte do dia a dia das pessoas e é um dos principais metais comerciais. Apesar de todas as evoluções, o processo de redução do alumínio ainda é o processo metalúrgico com a maior demanda por energia <sup>(c.f. 3)</sup>.

Por isso, as crises hídricas e energéticas de 2013 a 2015 no Brasil, causaram impacto na produção de alumínio e no processo desde a sua exploração até o destino final. Essa relação é de suma importância para o

---

<sup>1</sup> Estes termos estão sendo utilizados neste trabalho, não sendo associado à nenhuma outra referência aqui citada.

entendimento da produção de alumínio e da sua relação com a sociedade brasileira.

## 2 Revisão Bibliográfica

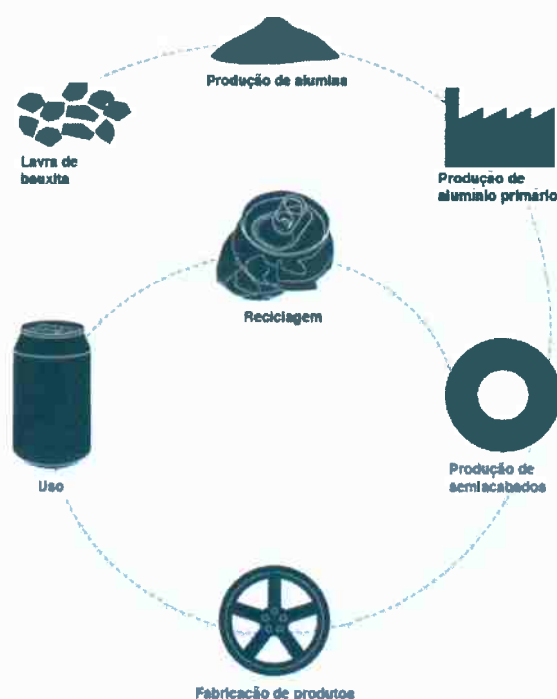
### 2.1 Alumínio – Propriedades Físicas e Químicas

O alumínio é o terceiro elemento químico mais abundante, representado pelo símbolo Al e número atômico 13. Seus 13 elétrons são distribuídos em  $1s^2$ ,  $2s^2$ ,  $2p^6$ ,  $3s^2$  e  $3p^1$  <sup>(4)</sup>.

O alumínio está em grande abundância na Terra, uma vez que associa-se facilmente a outros elementos. Possui grande afinidade com oxigênio e, por isso, é raramente encontrado em sua forma natural. Desta forma, locais que possuem grandes quantidades de oxigênio e presença de alumínio é possível encontra-lo em uma forma mais pura <sup>(5)</sup>.

O alumínio pode ser classificado quanto à sua produção, sendo denominado alumínio primário e alumínio secundário. O primário é o alumínio proveniente da mineração e o secundário proveniente da reciclagem <sup>(5)</sup>. O ciclo do alumínio pode ser representado por 7 processos (fig. 1). O primeiro é determinado pela sua extração na natureza, comumente junto com outro tipo de material (e.g. bauxita). O segundo processo é determinado pela produção de alumina, ou óxido de alumínio, geralmente encontrado na forma de coríndon, i.e. o minério que dará origem ao alumínio <sup>(4)</sup>.





**Figura 1 - Ciclo do Alumínio, como demonstrado no site da Hydro<sup>2</sup>.**

Para a produção do alumínio primário, o minério precisa passar por dois processos, conhecidos como Bayer e Hall-Heroult. O processo Bayer extrai a alumina proveniente da Bauxita. Essa alumina, entretanto, ainda precisa passar por outro processo, para transformá-la em alumínio; isto é feito através do processo Hall-Heroult. Neste trabalho será tratado apenas do alumínio primário, uma vez que o alumínio secundário não possui grandes gastos energéticos em sua produção (c.f. 6).

### **2.2.1. Alumínio Primário**

O alumínio primário pode ser produzido em diversos graus de pureza, geralmente atingindo de 99% a 99.999% (até mesmo superior a esse número) <sup>(5)</sup>. Ainda, Drozdov discute que há três tipos de classificação do alumínio baseada em sua produção:

<sup>2</sup> <https://hydro.com/pt-BR/a-hydro-no-brasil/Sobre-o-aluminio/Ciclo-de-vida-do-aluminio/Passos-de-producao/>

1. Alumínio Comercialmente Puro: é o metal que vem da redução do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Alumínio Óxido) em uma célula eletrolítica e é a base da produção comercial. Pode conter até 1% de impureza e raramente excede 99.99% de pureza.
2. Alumínio Refinado: é produzido por eletrorefinamento do alumínio comercial e varia entre 99.9 a 99.999% de pureza.
3. Alumínio Refinado por Zona: É o refino por zonas e, com o material e a técnica certa desde o começo, pode produzir metal com impurezas a uma taxa de menos de uma parte por milhão (ppm).

Embora o alumínio seja um elemento comum e abundante, nem todos minerais de alumínio possuem uma viabilidade econômica. Quase todos alumínios metálicos são produzidos a partir da bauxita ( $\text{AlOx}(\text{OH})_{3-2x}$ ). A bauxita ocorre como um produto de baixo ferro e sílica em condições climáticas tropicais. Em 2017, a maior parte da bauxita foi extraída da Austrália, China, Guiné e Índia <sup>(7)</sup>.

## 2.2 Bauxita

A Bauxita é o principal minério encontrado em associação com o alumínio. Foi identificada pela primeira vez em 1821, pelo geólogo Pierre Berthier, na província de Les Baux, localizada no sul da França.

É encontrada principalmente em locais de clima tropical ou subtropical, sendo fruto do intemperismo e lixiviação de uma gama variável de rochas. O minério apresenta aspecto avermelhado (fig. 2), devido a presença de ferro, e sua composição deve apresentar um mínimo de 30% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para ser considerada aproveitável para a extração de alumínio <sup>(8)</sup>.



**Figura 2 - Imagem representativa da bauxita <sup>(9)</sup>.**

Além da produção de alumínio primário, o minério é utilizado em aplicações não metalúrgicas como: Refratários (31%), abrasivos (24%), produtos químicos (16%), cimentos de alta alumina e fabricação de aço (11%) <sup>(8)</sup>.

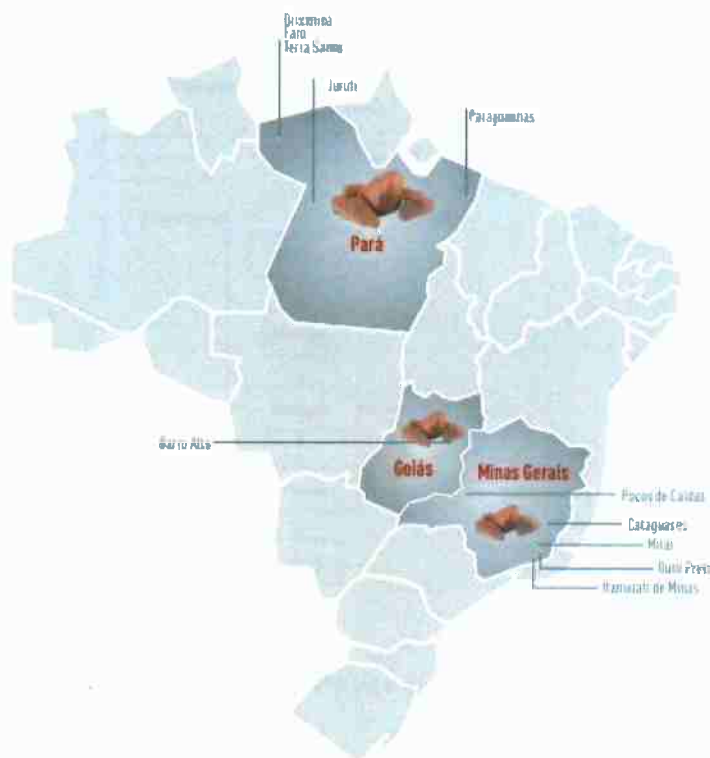
Com 37 milhões de toneladas de bauxita produzidas em 2015 o Brasil ocupou o terceiro lugar no panorama global, atrás da Austrália com 81 milhões de toneladas e da China com 65 milhões de toneladas <sup>(9)</sup>, como demonstrado na (Tabela 1).

**Tabela 1 – Tabela comparativa da produção de Bauxita, Alumina e Alumínio entre os países mais produtores.**

Ranking	Reservas de Bauxita <small>Em milhões de toneladas</small>		Produção <small>Em milhões de toneladas</small>					
	Países	Volume	Bauxita	Volume	Alumina	Volume	Alumínio Primário	Volume
1º	Guiné	7 400	Austrália	81 741	China	58 978	China	31 870
2º	Austrália	6 200	China	65 000	Austrália	20 097	Rússia	3 454
3º	Brasil	2 600	Brasil	37 057	Brasil	10 452	Canadá	3 209
4º	Vietnã	2 100	Guiné	27 605	Índia	5 000	Emirados Árabes	2 471
5º	Jamaica	2 000	Índia	24 219	Estados Unidos	4 541	Índia	1 909
6º	Indonésia	1 000	Jamaica	8 540	Rússia	2 593	Austrália	1 646
7º	China	980	Malásia	7 664	Jamaica	1 865	Noruega	1 231
8º	Guiana	850	Rússia	5 432	Canadá	1 561	Bahrain	971
9º	Índia	590	Cazaquistão	4 802	Ucrânia	1 481	Estados Unidos	818
10º	Suriname	580	Grécia	2 100	Cazaquistão	1 448	Brasil	793
11º	Arábia Saudita	210	Arábia Saudita	1 660	Espanha	1 400	Islândia	764
	Outros	3 490	Outros	4 672	Outros	7 284	Outros	8 421
	Total	28 000		270 492		116 700		57 557

Fontes: British Geological Survey, 2011 - 2015  
U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2017  
World Metal Statistics - March 2017

No Brasil, apenas três estados apresentam minas exploradoras de bauxita: Goiás, Minas Gerais e Pará (fig. 3). O Pará concentra 91% da produção para fins de uso metálico, seguido por Minas Gerais e Goiás.



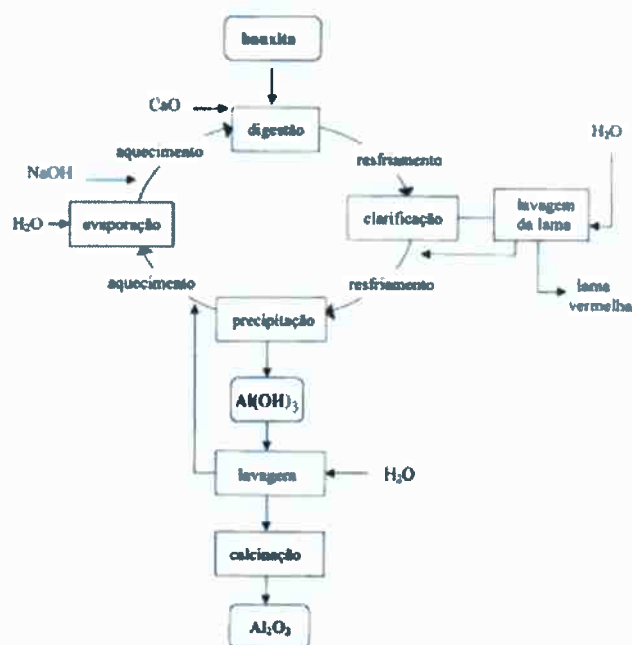
**Figura 3 - Imagem representativa dos três estados que possuem exploração de bauxita. Retirada de <sup>(9)</sup>.**

Na produção de alumínio primário, a Bauxita passa por um processo denominada processo Bayer, descrito a seguir.

### 2.3 Processo Bayer

O Processo Bayer é processo comercial mais importante para a purificação da bauxita <sup>(10)</sup>. Ele foi desenvolvido e patenteado em 1888, pelo químico austríaco Karl Josef Bayer, residente de São Petersburgo – Rússia – em uma patente denominada “*A Process for the Production of Aluminum Hidroxyde*” <sup>(11)</sup>. O método consiste em duas etapas: na digestão e clarificação da Bauxita

triturada, onde o resultado é a precipitação de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  depois o Hidróxido de alumínio é lavado e calcinado e o resultado é a alumina <sup>(12-14)</sup> (fig. 4).



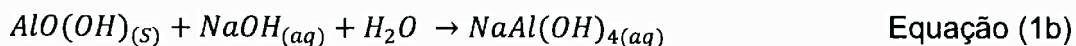
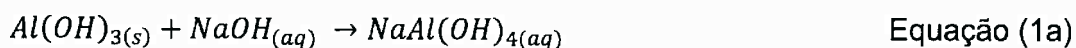
**Figura 4 - Processo Bayer para a purificação da bauxita e a extração da alumina <sup>(9)</sup>.**

A primeira etapa do processo consiste na moagem da bauxita, pré-requisito para a digestão do minério. O processo de digestão é feito com uma solução de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) sob temperatura e pressão controladas conforme a composição do minério (Tabela 2).

**Tabela 2- Processo de digestão da bauxita <sup>(12)</sup>.**

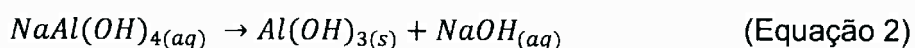
Composição da bauxita	Temperatura/K	$[\text{NaOH}]$ , g/L	$[\text{Al}_2\text{O}_3]$ final, g/L
Gibbsita	380	260	165
	415	105-145	90-130
Boehmita	470	150-250	120-160
	510	105-145	90-130
Diaspório	535	150-250	100-150

Nessa etapa, as espécies que contêm alumínio são dissolvidas pelo hidróxido de sódio, formando um licor verde <sup>(13)</sup>, demonstradas nas equações químicas (1a) e (1b).



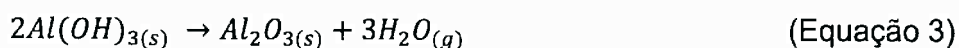
Ainda na digestão, temos a adição de óxido de cálcio (CaO), que ajuda a reduzir os íons carbonato e fosfato dissolvidos no meio.

A próxima etapa do processo é a clarificação. Nessa etapa ocorre a separação da solução de aluminato de sódio da lama vermelha (resíduo rico em óxido de ferro). Essa separação ocorre através de uma técnica de espessamento seguida de filtração. Após a separação, ocorre a precipitação, onde a solução de aluminato de sódio é esfriada. Após o esfriamento é feita a adição de uma pequena quantidade de cristais de alumina, para estimular a precipitação <sup>(14)</sup>, demonstrada na equação (2):



Após a separação, o hidróxido de sódio é concentrado por evaporação e retorna ao processo de digestão. Enquanto o hidróxido de alumínio é levado para a calcinação.

A calcinação é a última etapa do Processo Bayer, nela o hidróxido de alumínio é desidratado a cerca de 1000°C, formando a alumina <sup>(12-14)</sup>, demonstrado na equação (3).



Após se obter a alumina através do processo Bayer, esta passa pelo processo Hall-Heroult a fim de se obter o alumínio. A seguir, será apresentado uma seção explicando o processo Hall-Heroult.

## 2.4 Processo Hall-Heroult

Em 1886, de maneira independente, Charles Martin Hall nos Estados Unidos e Paul Louis Toussaint Héroult na França patentearam um processo que consiste na eletrólise, com eletrodos de carbono, da alumina dissolvida em fluoreto fundido para a produção do alumínio metálico <sup>(15)</sup>. Porém, apenas em 1889 começou a ter uma produção comercial. O processo consiste na redução da alumina em alumínio <sup>(11)</sup>.

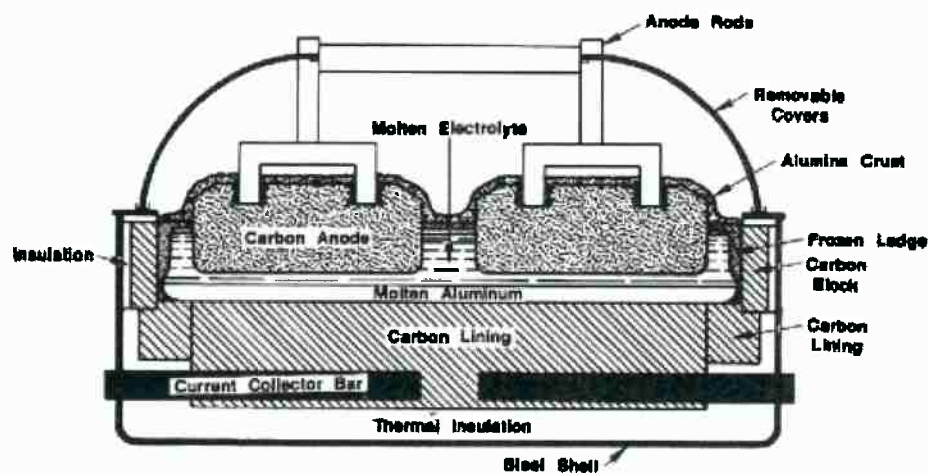
Os átomos de alumínio presentes na alumina estão ligados ao oxigênio e, para que haja a redução de alumina para o alumínio, é necessário a quebra desta ligação. A redução da alumina é realizada em cubas eletrolíticas em um banho de criolita,  $\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$  fundida à temperatura de  $906^\circ\text{C}$  (equações 4a e 4b) e o processo é principal método industrial de produção de alumínio primário <sup>(15)</sup>.



Com base na termodinâmica, o potencial reversível dessa equação é de 1.15V, porém, na indústria a tensão de decomposição é de 1.5 a 1.7 V, isso acontece devido à sobretensão anódica <sup>(15)</sup>.

A alumina é fundida e misturada com a criolita e eletrolisada em um tanque de aço revestido de grafita, que atua como cátodo. Os eletrodos também são feitos de grafita. A célula tem funcionamento contínuo, onde o alumínio líquido é retirado pelo fundo da célula e uma nova quantidade de alumina é depositada pela parte superior <sup>(16)</sup> (fig. 5).





**Figura 5 - Imagem representativa de uma célula eletrolítica <sup>(16)</sup>.**

O Brasil apesar de estar entre os grandes produtores de alumina – sendo o terceiro país com a maior reserva da Bauxita e o terceiro país com maior produção de alumina – está em 10º na produção de alumínio primário (ver tabela 1). Segundo os dados dispostos pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BDNES) <sup>(17)</sup>, em escala mundial, 55% da produção de alumínio utiliza recursos hídricos para o uso de energia.

## **2.5 Matriz Energética Brasileira**

A Matriz Energética de um país pode ser considerada toda a sua fonte de produção de energia. Nesta seção, será feita uma breve análise histórica da matriz energética brasileira, suas fontes de energias ao longo da história e das fontes de energia do futuro próximo.

Uma das definições de Matriz Energética pode ser “a oferta interna de energia (OIE) discriminada quanto às fontes e setores de consumo” <sup>(18)</sup>.



As primeiras redes elétricas chegaram ao Brasil em 1880 e tiveram alguns “incidentes críticos” <sup>(19)</sup>, conforme apresentado na figura 6.

**Quadro 1**  
**Principais etapas na formação do setor elétrico brasileiro**

Período	Principais eventos
1880-1930	Monopólio privado — primórdios do uso da energia elétrica no Brasil, com a implantação dos primeiros empreendimentos nacionais e estrangeiros, dominados a partir da década de 1920 pelas empresas de capital estrangeiro. Corresponde ao período da República Velha.
1931-45	Presença do Estado — o Estado elabora as primeiras regulamentações no setor, com destaque para a implantação do Código de Águas, em 1934. A aceleração do desenvolvimento econômico brasileiro corresponde a um aumento da demanda de energia que não tem contrapartida em investimentos. Corresponde ao governo de Getúlio Vargas.
1946-62	Estado indutor — com a queda de Vargas, é estabelecida uma maior participação do Estado no setor elétrico, com aumento dos investimentos públicos, especialmente nas concessionárias estaduais. Criação da Eletrobrás em 1962.
1963-79	Modelo estatal — a Eletrobrás é a empresa indutora do processo de nacionalização e estatização do setor elétrico, efetuando grandes investimentos. É consolidado um novo modelo institucional que atingiu seu ápice em 1979.
1980-92	Crise institucional — com a crise econômica se agravando, o crescimento do setor elétrico é afetado. Em 1992, a inadimplência é generalizada e o modelo estatal é questionado.
1993-2002	Modelo híbrido — promulgada a Lei nº 8.631/93, que equaciona os débitos. Começam as mudanças institucionais no setor elétrico brasileiro. Ao final de 2002, a geração e a transmissão de energia eram, majoritariamente, de empresas estatais e a distribuição era principalmente privada.

**Figura 6 - Imagem do quadro representativo dos incidentes críticos**  
(18).

Segundo os autores, incidentes críticos são “os acontecimentos que provocaram relevantes transformações no campo organizacional deste setor, numa determinada data”.

O Brasil é uma referência mundial no âmbito energético, ainda mais com as perspectivas de energia proveniente do Petróleo e do Etanol <sup>(15)</sup>. Entretanto, no final da década de 1970 até o começo dos anos 2000, o cenário brasileiro começou a investir na energia hidráulica <sup>(19, 20)</sup>.

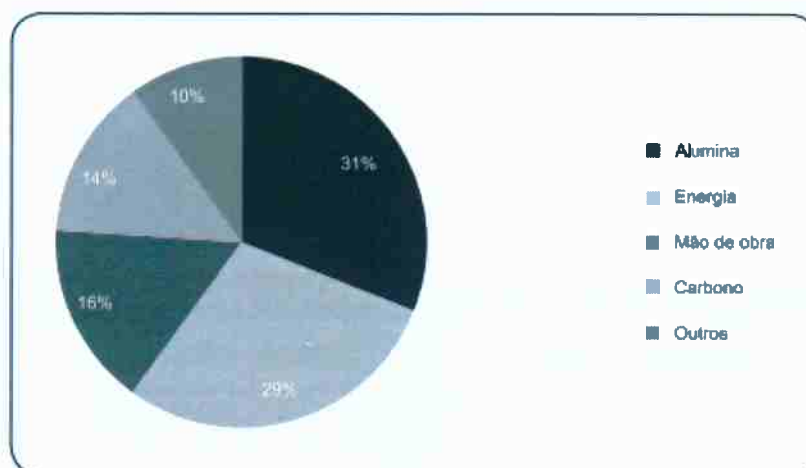
A energia hidráulica, desde o seu início no Brasil, foi o meio de energia predominantes, devido ao rico recurso hídrico brasileiro <sup>(21)</sup>. Para o aproveitamento da energia hidráulica, foram criadas as hidrelétricas. A primeira hidrelétrica do Brasil “foi construída para aproveitar a água disponível do Ribeirão do Inferno afluente do rio Jequitinhonha na época do reinado de D. Pedro II” <sup>(22)</sup>.

A maior hidrelétrica do Brasil é a Usina de Itaipu, localizada no Paraná, e a maior do mundo na época de sua construção <sup>(20)</sup>. Em seguida, por ordem decrescente de produção de energia são: Usina Hidrelétrica de Belo Monte (Pará), Usina Hidrelétrica São Luiz do Tapajós (Pará) e Usina Hidrelétrica de Tucuruí (Pará) e Usina Hidrelétrica de Santo Antônio (Rondônia) <sup>(23)</sup>.

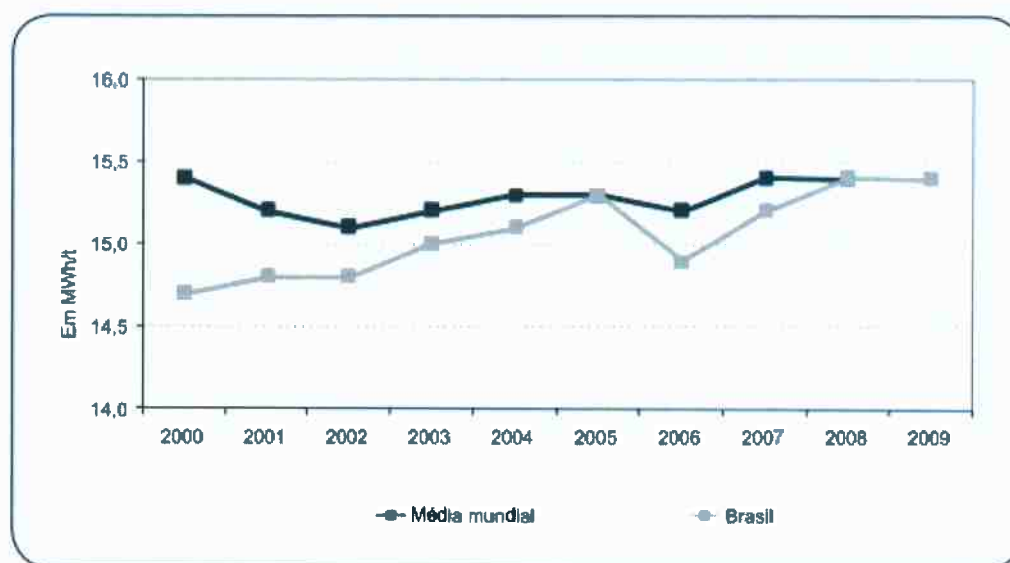
O Brasil possui “uma matriz energética de 85% baseada em energia hidrelétrica”. Além disso, algumas empresas que se encontram no ramo da produção de alumínio primário possuem um grande gasto de energia, criando um debate sobre essa questão na comunidade científica e na própria sociedade <sup>(24)</sup>. A seção a seguir tem como objetivo explorar a questão do uso de energia na produção de alumínio primário, com ênfase no processo Hall-Heroult.

## **2.6 O gasto de energia na produção do alumínio primário**

Como citado na seção 2.1, o alumínio primário possui um alto gasto de energia para ser produzido. No cenário nacional, atualmente é gasto mais de 6% de toda a energia elétrica produzida para transformar bauxita e alumina em alumínio. Este gasto representa 29% do custo da produção de alumínio primário e a média brasileira é de 35% <sup>(17)</sup> (fig. 7-8). Este gasto é de 15,6 megawatt/ hora (Mwh).



**Figura 7 – Custo de produção médio mundial de alumínio no primeiro trimestre de 2009. Retirada de <sup>(17)</sup>.**



**Figura 8- Consumo médio específico de energia elétrica na produção de alumínio primário. Retirada do <sup>(17)</sup>.**

A produção de alumínio primário, usou em 2010, em média, 15 MWh/t. Assim, para a produção de alumínio mundial foi gasto mais de 620 mil GWh de eletricidade, representando 3% da produção mundial de energia para esse ano <sup>(25)</sup>.

Os dois processos para a produção do alumínio primário – Bayer e Hall-Heroult – possuem diferentes gastos de energia, conforme demonstrado na figura 9.

TABELA 6. INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO X CONSUMO ENERGIA – 2010						
	Bauxita	Alumina	Alumínio primário	Transformados	Reciclagem*	Total
Produção (mil t)	32.028	9.431	1.536	1.349	488	44.832
Consumo de energia (GWh)	416	2.829	23.982	675	342	28.187
Consumo específico de energia (MWh/t)	0,013	0,3	15,6	0,5	0,7	–

(\*) Refere-se à recuperação da sucata.

Fonte: ABAL.

**Figura 9 - Gasto de energia durante a produção de alumínio primário. Imagem modificada de <sup>(9)</sup>.**

O processo Hall-Heroult, atualmente, tem um gasto menor de energia do que em sua época de produção <sup>(11)</sup>. Para ocorrer, o processo necessita de três matérias primas: Óxido de Alumínio (Alumina), eletricidade e carbono. Para a produção de 1 kg de alumínio é necessário a extração de 5.1kg de Bauxita, 1.93 kg de alumina e 0.45 kg de carbono. O gasto energético para a produção do alumínio primário é em torno de 0.012 MWh/t para a mineração de bauxita, 0.3 MWh/t para o refino, 15.6 MWh/t para o processo de redução e, cerca de, 20 MWh/t incluindo o eletro-refino para produzir 99.999% de alumínio puro <sup>(26)</sup>. Neste raciocínio, significa que para a produção de alumínio primário mundial anual de 2010 foi necessário 210 milhões de toneladas de Bauxita, 80 milhões de toneladas de alumina e 21 milhões de toneladas de carbono.

Os grandes gastos de energia para a produção de alumínio primário deixam este tipo de produção estritamente ligada às matrizes energéticas. Nos anos de 2013 a 2015, o Brasil sofreu a crise hídrica e a crise energética. As próximas seções tratam destas crises e como as mesmas estão relacionadas à produção de alumínio primário.

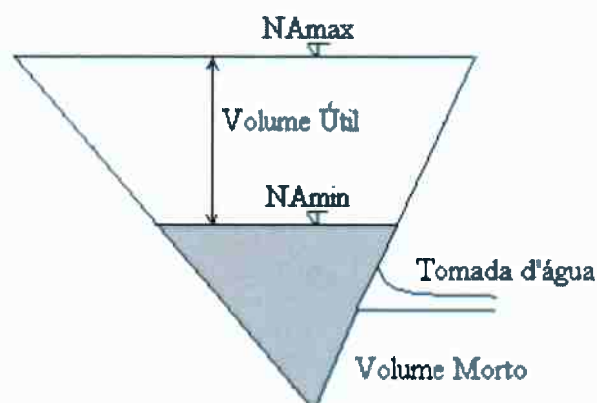
## 2.7 A Crise Hídrica (2013-2015)

Nos anos de 2013 a 2015 o Brasil enfrentou uma crise hídrica que afetou todo o país, bem como a produção de energia elétrica por consequência de problemas em usinas hidrelétricas.

Para entender a crise, é necessário entender a parte da história. Em 1934 foi criado o Código das Águas que determinava como deveria ser feito o uso das águas no território brasileiro. A partir deste código surgiu o Sistema Elétrico Brasileiro, criando empresas públicas – federais e estaduais – com início nos anos 1940, para controlar o que veio a ser a Taxa de Eletrificação. Desta forma, o uso da água passou a ter como prioridade a geração de energia elétrica <sup>(24)</sup>.

Porém, o uso da água para a geração de energia elétrica, através de hidrelétricas, já existia e pode ser considerado o “primeiro uso organizado em larga escala dos recursos hídricos no país” <sup>(28)</sup>.

As hidrelétricas utilizam o volume de água de um rio para a produção de energia elétrica. Porém, este volume é dividido em algumas partes: Nível de Água Máximo Operacional; Volume Útil; Nível de Água Mínimo Operacional; e, Volume Morto (fig. 10). O Volume Útil é aquele entre o Nível de Água Máximo Operacional e o Nível de Água Mínimo Operacional e deve ser compreendido como o volume necessário para o atendimento da população em casos de estiagens. Desta forma, mesmo que o volume útil acabe, ainda haverá água no reservatório <sup>(27)</sup>.



**Figura 10** - Imagem representativa dos componentes de um reservatório de água. Imagem retirada de <sup>(27)</sup>.

Nos anos de 2013 a 2015, durante a crise hídrica, houve momentos em que algumas usinas e reservatórios chegaram a utilizar o volume morto, como é o exemplo do Sistema da Cantareira. Quando os reservatórios de água chegam ao volume morto, o repasse para as usinas hidrelétricas é praticamente nulo, causando uma baixa drástica na produção de energia. O grupo Munich Re declarou que este foi o quinto maior desastre natural mais caro do mundo, com uma perda de 5 bilhões de dólares <sup>(28)</sup>.

## 2.8 A Crise Energética (2014-2015)

Como consequência da crise hídrica, o Brasil viveu uma crise energética nos anos de 2014 e 2015.

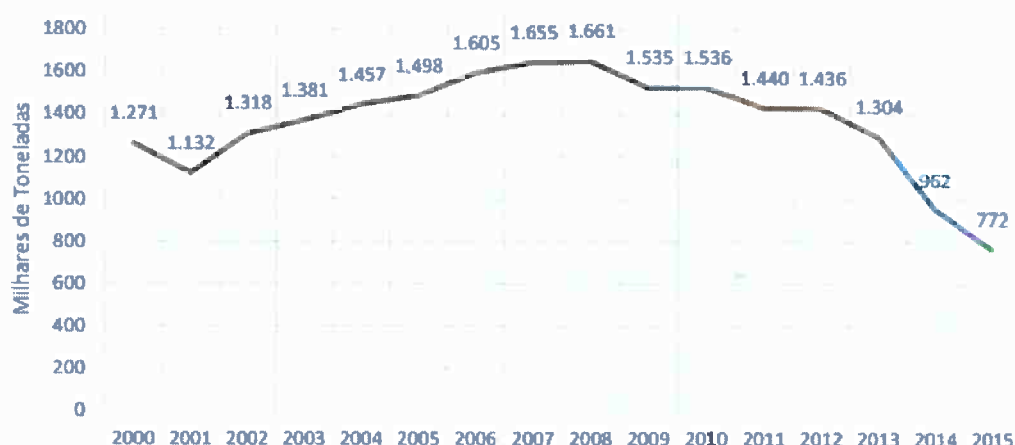
Como resultado da seca, os baixos níveis de água nos reservatórios hidrelétricos levaram ao governo aumentar a tarifa de energia elétrica em até 25% - denominadas tarifas vermelhas – além de uma campanha para redução de consumo de água pela população em 20% <sup>(29)</sup>.

A crise energética trouxe problemáticas não só para o uso da sociedade, majoritariamente residencial, mas também para o âmbito industrial.

Em relação ao alumínio, este período de crise trouxe o fechamento de algumas empresas produtoras de alumínio primário, como a Valesul e a

Alunordeste, além de três importantes fábricas - em Saramenha-MG, Poços de Caldas-MG e São Luís-MA – sendo a primeira da ALCAN e as duas últimas da ALCOA.

Esta perda para a produção de alumínio primário pode ser percebida pela queda no período de crise (fig. 11).

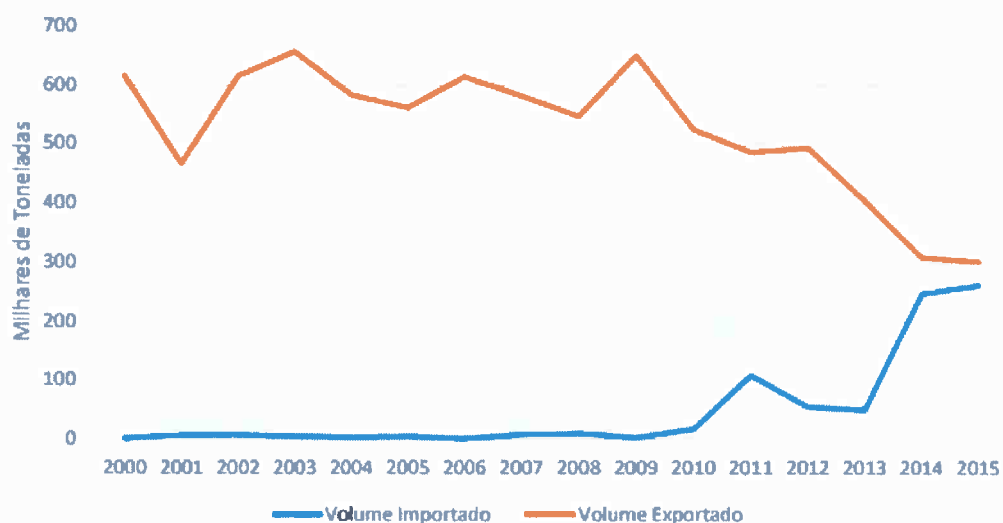


Fonte: Abal (2000 a 2016)

**Figura 11 - Produção Anual de Alumínio. Retirado de <sup>(9)</sup>.**

Conforme a figura, pode-se perceber que no ano de 2015 a produção de alumínio caiu quase 50% em relação a 2012.

Outro fator alarmante para o cenário do alumínio primário é o crescimento da importação no período da crise (fig. 12). O aumento da importação de alumínio primário, junto com a diminuição da exportação, demonstra que, durante o período de crise, o Brasil também apresentou problemas em relação ao mercado.



**Figura 12 - Importação e Exportação de Alumínio Primário no Brasil de 2000 a 2015. Retirado de <sup>(9)</sup>.**

Desta forma, é imprescindível saber a razão e qual a influência das crises hídrica e energética neste déficit de produção de alumínio primário.

O próximo capítulo trata sobre os objetivos deste trabalho. Em seguida é apresentada a metodologia utilizada para a análise da influência da crise hídrica e energética na produção de alumínio primário. A partir da metodologia, é apresentado os resultados e discussão. Por fim, as conclusões que puderam ser retiradas de todo este trabalho.



### **3 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo a análise da influência da crise hídrica/energética nos anos de 2013 a 2015 na produção de alumínio primário através de comparações de dados.

#### **Objetivo Geral:**

- Realizar a análise da influência da crise hídrica e energética, nos anos de 2013 a 2015, na produção de alumínio primário.

#### **Objetivos Específicos:**

- Determinar quais fatores da crise hídrica e energética mais influenciaram a produção de energia;

- Determinar a significância da relação entre os diferentes fatores que ocorreram na crise;

- Determinar como o comércio nacional foi afetado pela crise e a produção de alumínio primário;

- Debater a situação atual da produção do alumínio primário com perspectivas futuras.

## **4 Metodologia**

### **4.1 Dados Pluviométricos**

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se os dados pluviométricos entre os anos 2002 e 2017 de seis cidades: Belém, Machado, Pompeu, Sorocaba, Taubaté e Votuporanga. Estes dados foram retirados do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia. Os dados foram plotados em um gráfico, com a utilização do EXCEL, para demonstrar as diferenças, e a média, dos anos selecionados.

As cidades selecionadas possuem em suas localidades, ou em localidades próximas, uma usina hidrelétrica e indústrias produtoras de alumínio primário.

As hipóteses testadas foram verificar a média dos dados pluviométricos e relacioná-la com os anos de crise hídrica e crise energética. Desta forma, é possível saber se a precipitação está diretamente relacionada com estas crises.

#### **4.1.1 Belém**

Belém é a capital do estado do Pará e uma das localidades com exploração da bauxita, além da produção de alumínio primário <sup>(30)</sup>. Segundo Monteiro:

“[...] a instalação de uma cadeia produtiva de alumínio primário no Estado do Pará, constituída pela exploração da bauxita pela Mineração Rio do Norte S.A, pela Alunorte S.A produtora de alumina e pela Albras S.A produtora de alumínio primário, se apresenta como um exemplo desta reorganização econômica, aqui entendida como resultado local de um processo de reestruturação que gera diversas formas coexistentes de reorganização produtiva e espacial, tanto em nível regional, como global.

Além disso, Belém localiza-se próxima a Usina Hidrelétrica de Tucuruí (fig 13) – a segunda maior usina hidrelétrica do Brasil, que se utiliza das águas do rio Tocantins e possui capacidade de mais de 4.245 MW.



**Figura 13 - Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Imagem retirada da internet.**

#### **4.1.2 Machado**

A cidade Machado, localizada em Minas Gerais, abriga uma parte do Rio Machado. O rio Machado despeja suas águas na Usina Hidrelétrica das Furnas (fig. 14) e abriga a Usina Hidrelétrica de Poço Fundo (oficialmente Usina Hidrelétrica Oswaldo Costa), em Poço Fundo – Minas Gerais <sup>(31)</sup>.



**Figura 14- Usina Hidrelétrica de Furnas. Imagem retirada da internet.**

#### **4.1.3 Pompeu**

A cidade de Pompeu, assim como Machado, está localizada no Estado de Minas Gerais. Abriga, em seu município, a Usina Hidrelétrica do Retiro Baixo. Esta usina, conforme a própria apresentação do site da Retiro Baixo Energético <sup>(32)</sup>.

Com potência instalada de 82MW, a Usina Hidrelétrica Retiro Baixo, implantada pelo Consórcio Construtor Retiro Baixo (CCRB), está localizada entre os municípios de Curvelo e Pompéu (MG), no baixo curso do Rio Paraopeba, afluente do Rio São Francisco [...]. O Rio Paraopeba nasce no município de Cristiano Ottoni e possui 512Km de extensão até seu encontro com o Rio São Francisco. A UHE Retiro Baixo está localizada próximo ao município de Felixlândia, a aproximadamente a 5Km de distância do remanso da UHE Três Marias.

A Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo (fig. 15) possui potência de 82 MW e produção de energia firme de 38,5 MW.



**Figura 15 - Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo. Imagem retirada da Internet.**

#### **4.1.4 Sorocaba**

A cidade de Sorocaba, localizada no Estado de São Paulo, é abastecida pela Usina Hidrelétrica de Itupararanga (fig. 16) em cerca de 80% da população utilizando o Rio Sorocaba e, no momento de sua criação possuía uma produção de 55 MW <sup>(33)</sup>.





**Figura 16 - Usina Hidrelétrica de Itupararanga. Imagem retirada da internet.**

#### **4.1.5 Taubaté**

Taubaté, localizada no estado de São Paulo, é abastecida pela Usina Hidrelétrica de Paraibuna (fig. 17). Esta usina foi construída em 1978 e possui potência de 87,02 MW. As suas barragens estão entre as mais altas do Brasil com 104 m <sup>(34)</sup>.



**Figura 17 - Usina Hidrelétrica de Paraibuna. Imagem retirada de <sup>(34)</sup>.**

#### **4.1.6 Votuporanga**

A cidade de Votuporanga, assim como Sorocaba e Taubaté, está localizada no Estado de São Paulo. Entretanto, a usina em que possui relação – a Usina Hidrelétrica Engenheiro Souza Dias (Jupiá) (fig. 18) – está na divida de São Paulo com o Estado do Mato Grosso do Sul, utilizando-se das águas do rio Paraná. Segundo o site da Companhia Energética de São Paulo:

Essa usina possui 14 unidades geradoras com turbinas Kaplan com potência instalada de 1.551,2 MW e dois grupos turbina-gerador, para serviço auxiliar, com potência instalada de 4.750 kW em cada grupo <sup>(35)</sup>.



**Figura 18 - Usina Hidrelétrica Engenheiro Souza Costa (Jupia). Imagem retirada da internet.**

#### **4.2 Dados de Energia e da Produção de Alumínio Primário**

Os dados referentes à energia foram retirados de matérias e reportagens da imprensa brasileira, fundamentadas em informações de instituições governamentais.

Os dados de produção de alumínio primário foram retirados dos relatórios anuais da ABAL. A cada ano, a Associação Brasileira de Alumínio reporta, além de diversas informações sobre o alumínio, os dados de produção de alumínio, incluindo o alumínio primário, em relação a cada empresa produtora.

Estes dados foram coletados, organizados em uma tabela EXCEL e plotados em gráficos.



A partir dos dados coletados, foi feita a análise por período, entre as diferentes informações obtidas a fim de relacionar as crises hídrica e energética com a produção de alumínio primário.

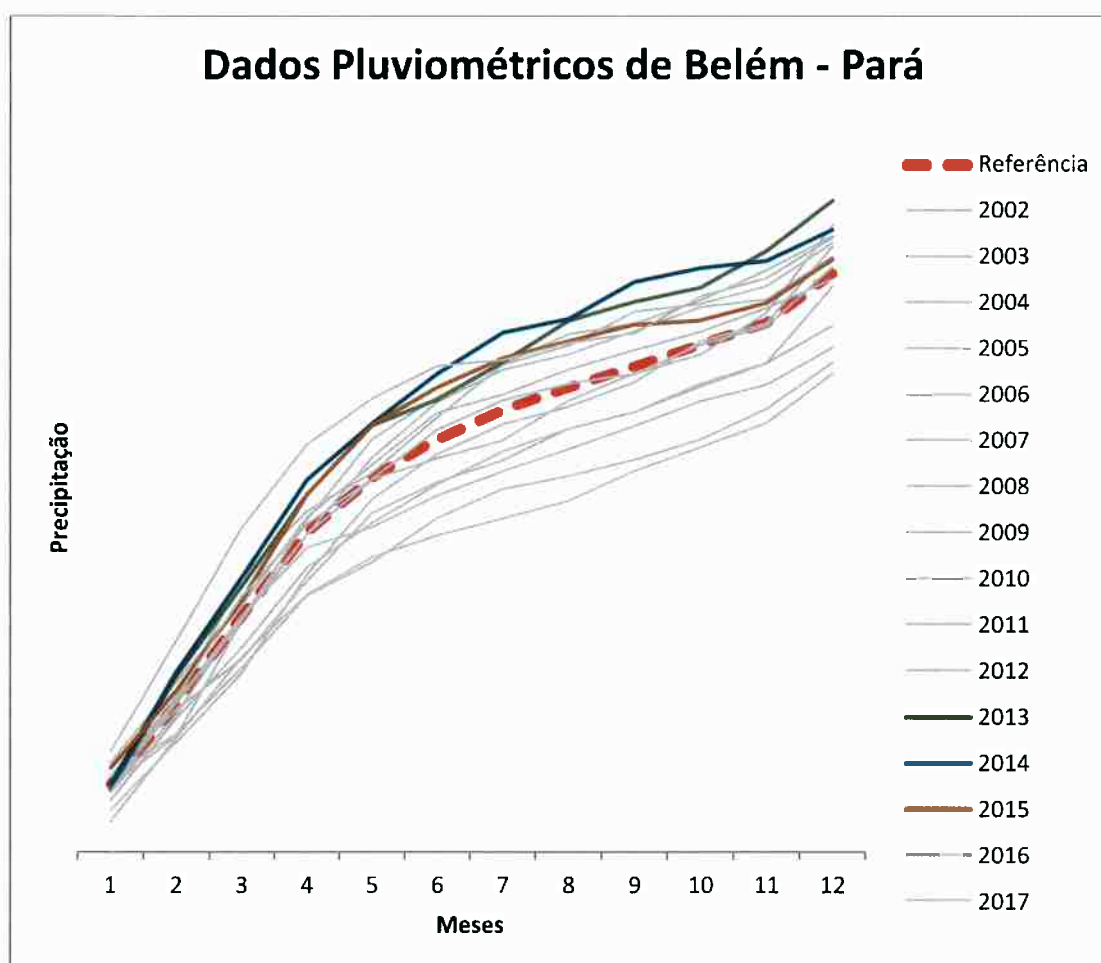
## **5 Resultados e Discussão**

### **5.1 Análise dos Dados Pluviométricos**

Para testar a hipótese de que nos anos de 2013 a 2015, caracterizados pelas crises hídrica e energética, os dados pluviométricos estavam abaixo da média dos últimos anos, foi feita uma análise desde 2002 até 2017, apresentada, por cidade, nas subseções abaixo.

#### **5.1.1 Belém**

A figura 19 demonstra a relação da precipitação durante os diferentes meses do ano em relação aos anos de 2002 a 2017 na cidade de Belém – Pará.

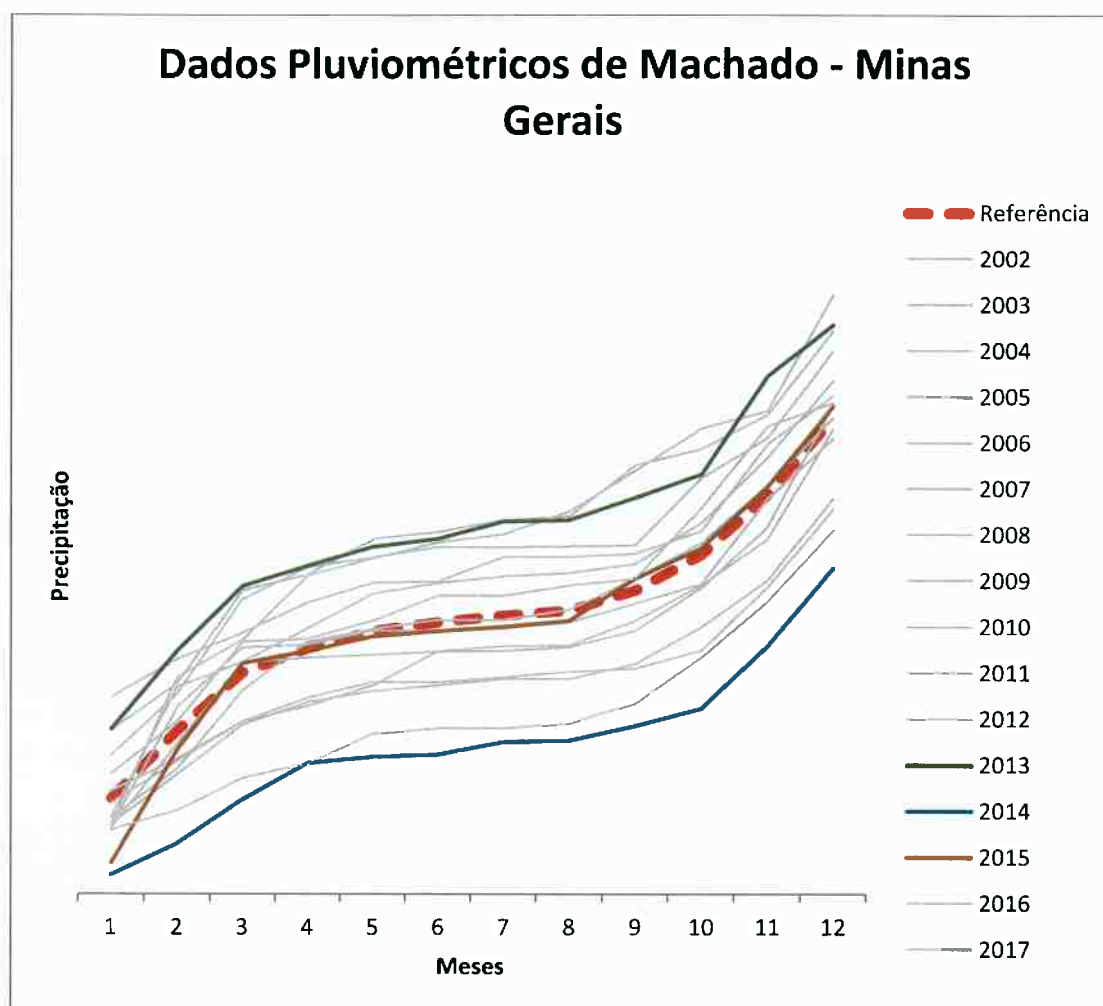


**Figura 19 - Dados Pluviométricos da cidade de Belém em relação à precipitação durante os 12 meses do ano.**

A referência significa os dados médios encontrados em relação a todos os anos. Os dados pluviométricos obtidos da cidade de Belém demonstram que, durante os anos de 2013 a 2015, só apresentou nível abaixo da média no mês de janeiro de 2013.

### **5.1.2 Machado**

A figura 20 demonstra a relação da precipitação durante os diferentes meses do ano em relação aos anos de 2002 a 2017 na cidade de Machado – Minas Gerais.

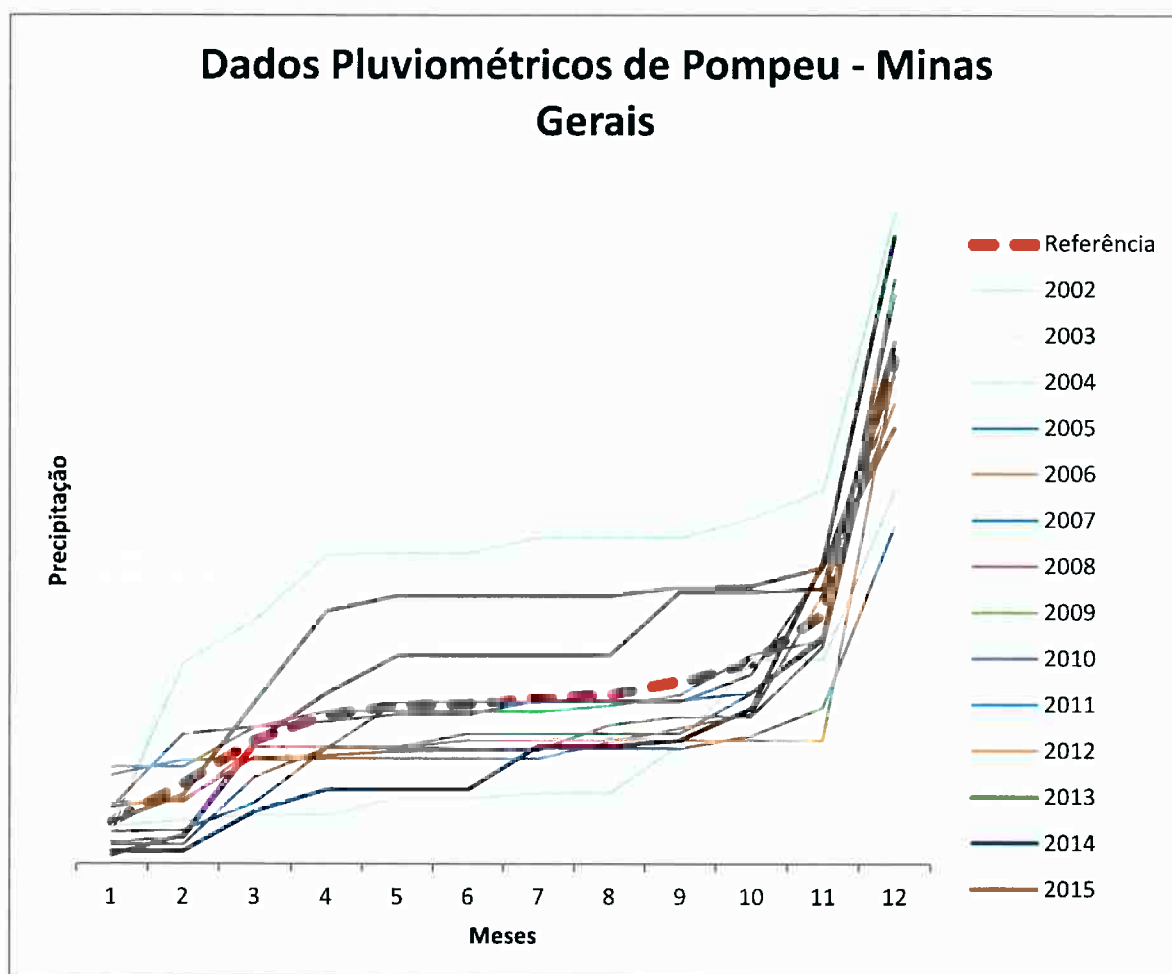


**Figura 20 - Dados Pluviométricos da cidade de Machado em relação à precipitação durante os 12 meses do ano.**

A cidade de Machado apresentou níveis de precipitação abaixo da média dos últimos anos, durante o período das crises, em todo o ano de 2014 e janeiro, fevereiro, abril, maio, junho, julho e agosto de 2015. O ano de 2013 foi todo acima da média, porém, 2017, assim como 2014, apresentou o ano inteiro abaixo da média.

### 5.1.3 Pompeu

A figura 21 demonstra a relação da precipitação durante os diferentes meses do ano em relação aos anos de 2002 a 2015 na cidade de Pompeu – Minas Gerais.



**Figura 21- Dados Pluviométricos da cidade de Pompeu em relação à precipitação durante os 12 meses do ano.**

A cidade mineira Pompeu apresentou níveis de precipitação abaixo da média, no período das crises, durante janeiro, fevereiro e dezembro de 2013; de janeiro a outubro de 2014; e, de janeiro a março de 2015.

#### 5.1.4 Sorocaba

A figura 22 demonstra a relação da precipitação durante os diferentes meses do ano em relação aos anos de 2002 a 2017 na cidade de Sorocaba – São Paulo.

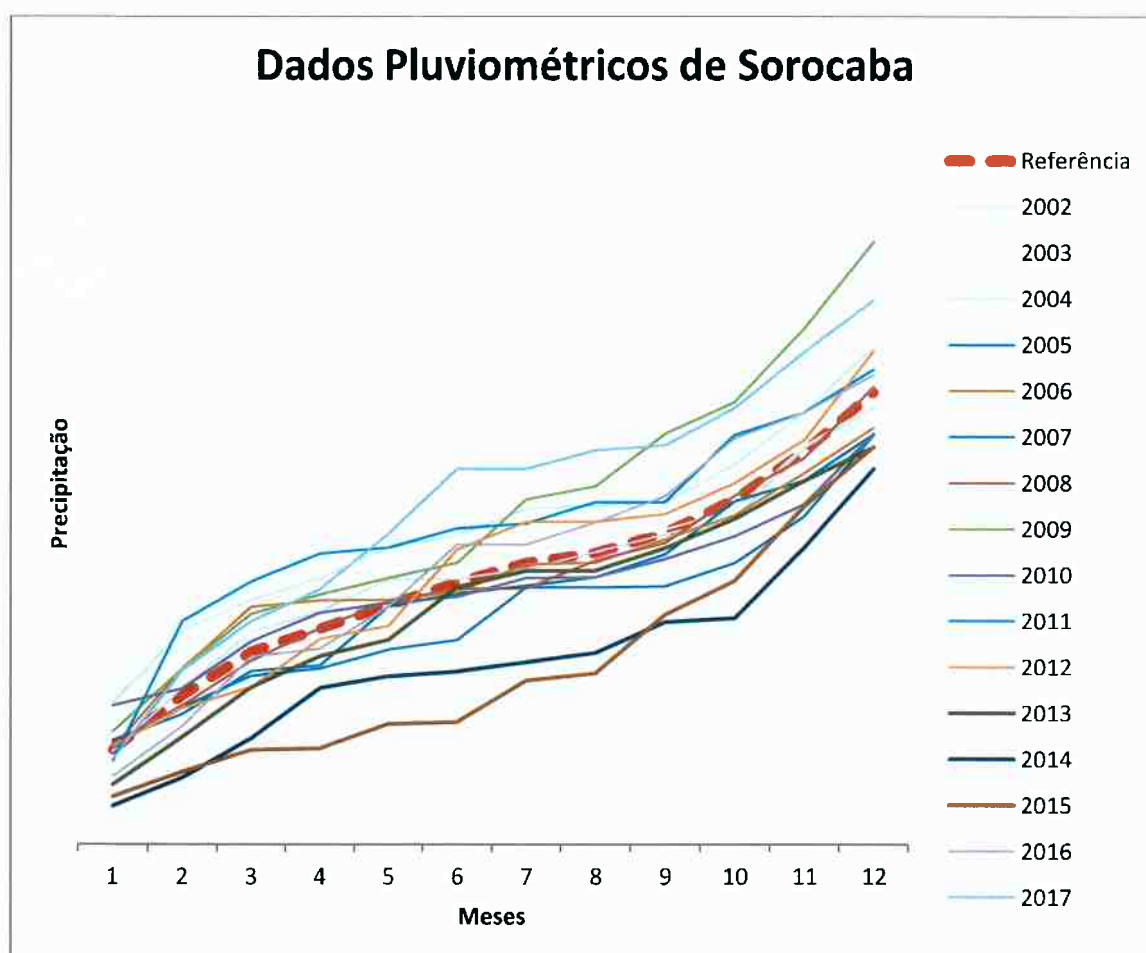
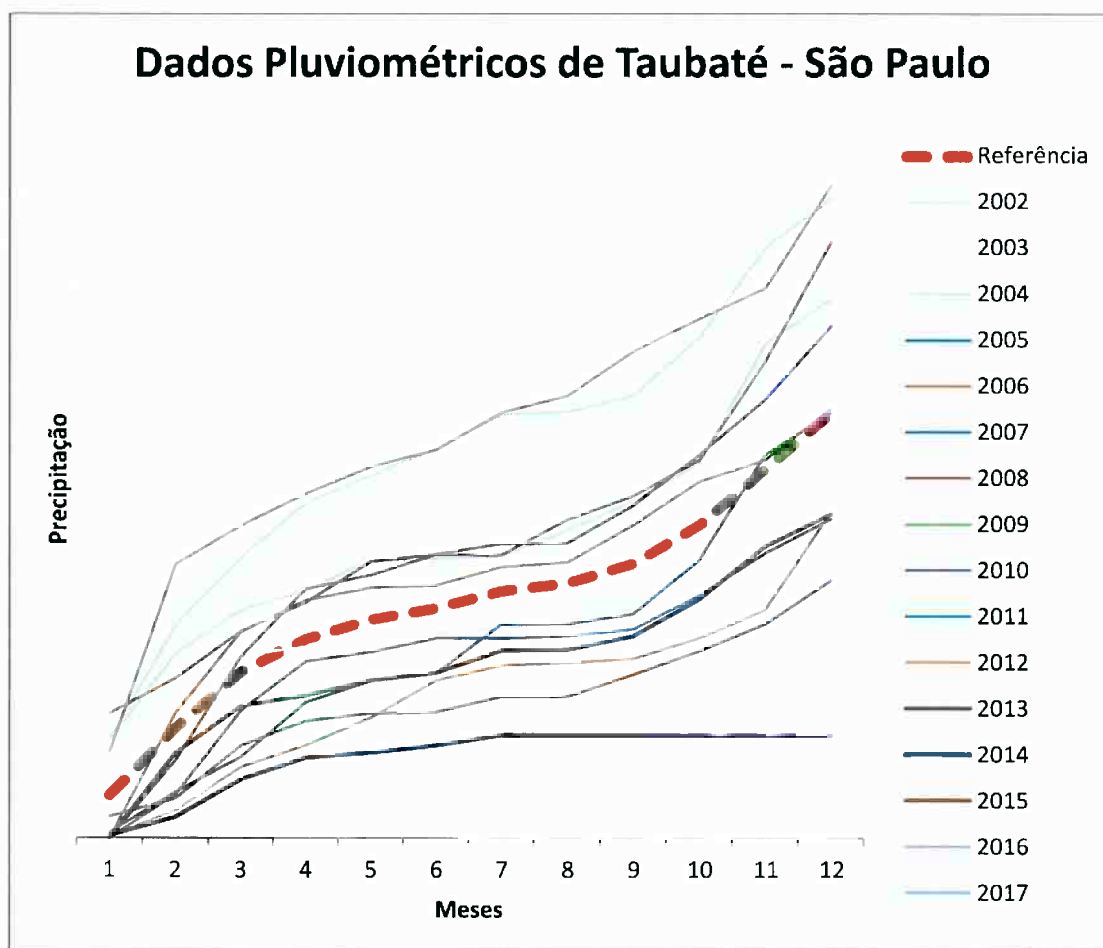


Figura 22- Dados Pluviométricos da cidade de Sorocaba em relação à precipitação durante os 12 meses do ano.

A partir da figura 22 é possível perceber que, na cidade de Sorocaba, apresentou uma precipitação nos anos de 2013 a 2015 menor do que a média da precipitação nos últimos anos em todos os meses.

### 5.1.5 Taubaté

A figura 23 apresenta a relação da precipitação durante os diferentes meses do ano em relação aos anos de 2002 a 2014 na cidade de Taubaté – São Paulo.



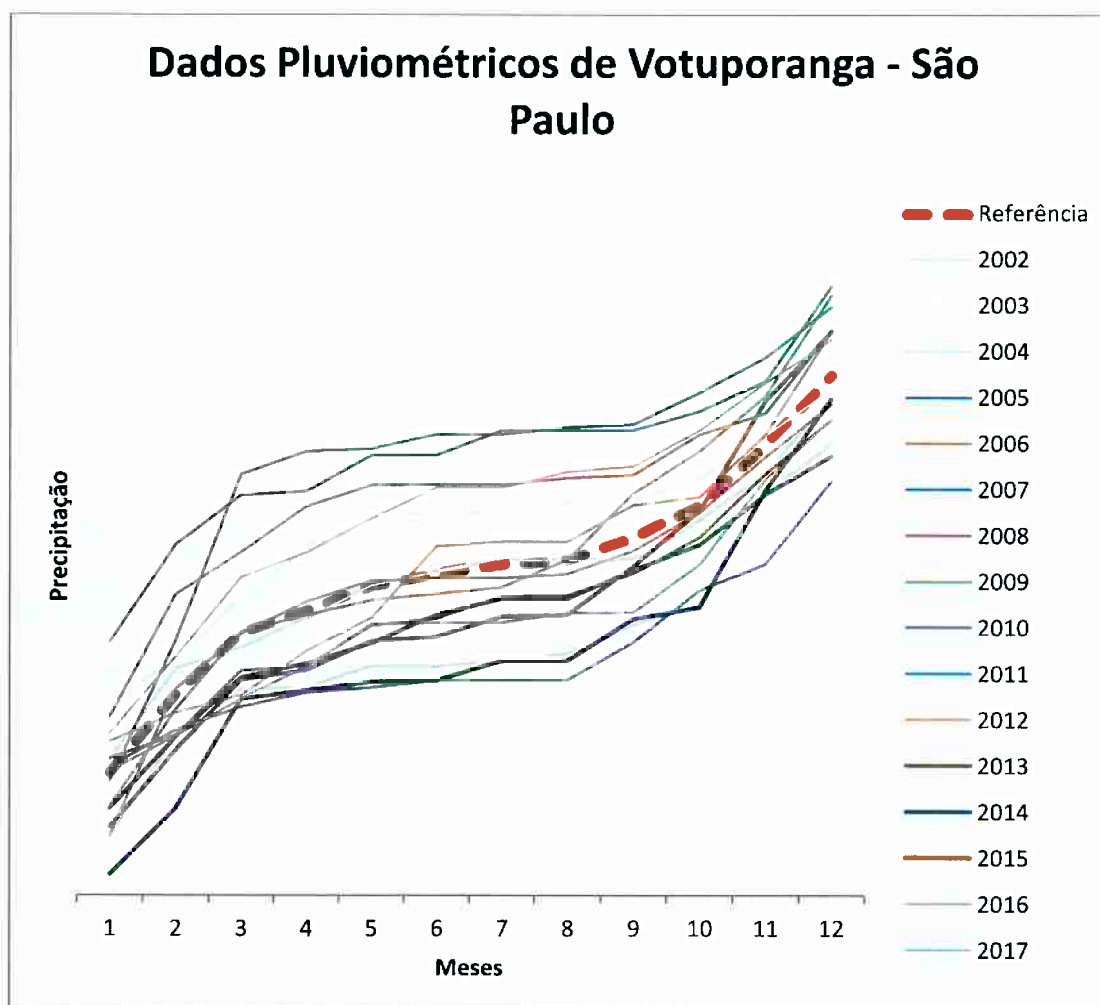
**Figura 23- Dados Pluviométricos da cidade de Taubaté em relação à precipitação durante os 12 meses do ano.**

A cidade de Taubaté representou o pior dado pluviométrico. Além de todos os anos das crises hídrica e energética – i.e. 2013 e 2014 – estarem abaixo da média, os anos de 2010 a 2012 também apresentaram todos os meses com níveis pluviométricos abaixo da média.

#### **5.1.6 Votuporanga**

A figura 24 apresenta a relação da precipitação durante os diferentes meses do ano em relação aos anos de 2002 a 2017 na cidade de Votuporanga – São Paulo.





**Figura 24- Dados Pluviométricos da cidade de Votuporanga em relação à precipitação durante os 12 meses do ano.**

A cidade paulista Votuporanga apresentou, praticamente, todos os meses de 2013 a 2015 abaixo da média de precipitação dos últimos anos, com exceção de novembro e dezembro de 2015.

### **5.1.7 Discussão**

Em relação as seis cidades, considerando todos os meses de 2013 a 2015 – época das crises hídrica e energética – a maioria teve nível de precipitação menor do que a própria média dos últimos anos.

Essa baixa no nível de precipitação atinge o nível de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas e, por consequência, o preço da energia elétrica. Belém, como demonstrado no Gráfico 1, não apresentou baixa no nível de precipitação e, portanto, nos níveis de água, tendo inclusive chegado no nível máximo <sup>(36)</sup>.

Já a Usina Hidrelétrica de Furnas, em Minas Gerais, atingiu níveis baixos da quantidade de água de seus reservatórios, chegando a menos de 30% em 2014 <sup>(37)</sup>. Já em 2016 houve uma melhora, mas os especialistas, naquele momento, alertavam que não seria duradouro <sup>(38)</sup>. No ano seguinte, outra baixa atingiu Furnas e as contas de luz ficaram mais cara <sup>(39)</sup>. Em 2018, Furnas apresentou em julho o nível de água mais baixo dos últimos três anos <sup>(40)</sup>.

Já a outra usina mineira aqui analisada, a Usina Hidrelétrica do Retiro Baixo, apresentou níveis mais preocupantes. Em 2015, em resposta à seca do ano anterior e do presente, 102 municípios entraram em estados de emergência e os níveis do reservatório caíram para 4,3% do nível total <sup>(41)</sup>.

Em Sorocaba, cidade que apresentou nível de precipitação abaixo da média durante 2013 a 2015, teve que enfrentar um racionamento de água, pois, além da baixa no nível dos reservatórios da Usina Hidrelétrica de Itupararanga, ainda teve uma baixa de mais de 90% na Represa de Ipaneminha que ajuda a abastecer a cidade <sup>(42)</sup>. Já em 2016, as chuvas contribuíram para a volta do nível de água normal <sup>(43)</sup>.

Em janeiro de 2015 a Usina Hidrelétrica de Paraibuna parou de funcionar, deixando de gerar energia, sendo a segunda usina em janeiro de 2015 que desativou <sup>(44)</sup>. Porém, no mês seguinte, voltou a gerar energia após um período

de chuvas e crescente no nível de água dos reservatórios <sup>(45)</sup>. Em agosto do mesmo ano, parou de produzir energia de novo <sup>(46)</sup>.

Além das usinas hidrelétricas e das cidades aqui citadas, diversos outros lugares, principalmente no Sudeste, tiveram impacto com a crise hídrica e energética. Já em 2014 havia a preocupação com a economia e a previsão de que o preço da energia subiria de 20 a 25% devido aos empréstimos do governo às usinas <sup>(47)</sup>.

Para contornar os prejuízos dados pela baixa produção de energia pelas usinas hidrelétricas, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) implementou a chamada tarifa “Bandeira Vermelha”, no início de 2015. Esta tarifa, junto com as Bandeiras Verde e Amarela, é definida no site da ANEEL <sup>(48)</sup> como:

Bandeira verde: condições favoráveis de geração de energia. A tarifa não sofre nenhum acréscimo;

Bandeira amarela: condições de geração menos favoráveis. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,010 para cada quilowatt-hora (kWh) consumidos;

Bandeira vermelha - Patamar 1: condições mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,030 para cada quilowatt-hora kWh consumido.

Bandeira vermelha - Patamar 2: condições ainda mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,050 para cada quilowatt-hora kWh consumido.

De abril de 2015 até fevereiro de 2016 todas as bandeiras implementadas foram a vermelha; mudando para amarela em março de 2016; e, verde em abril do mesmo ano <sup>(49)</sup>.

Além disso, em 1º de fevereiro de 2014, foi criado o Programa de Bônus: o cliente que reduzisse 20% (vinte por cento) do seu consumo de água, receberia um desconto de 30% (trinta por cento) na sua conta. Ainda assim, não houve redução no gasto de água pelos usuários e, então, foi criado o Plano de Contingência:

que é cobrada dos clientes cujo consumo mensal ultrapasse a média apurada no período de fevereiro/13 a janeiro/14. A tarifa de contingência é aplicada inclusive para clientes com contrato de Demanda Firme, em sua maioria indústria e comércio. A tarifa de contingência é de 40% sobre o valor da tarifa de água para quem exceder em até 20% a média do consumo ou 100% sobre o valor da tarifa de água para quem ultrapassar 20% da média <sup>(50)</sup>.

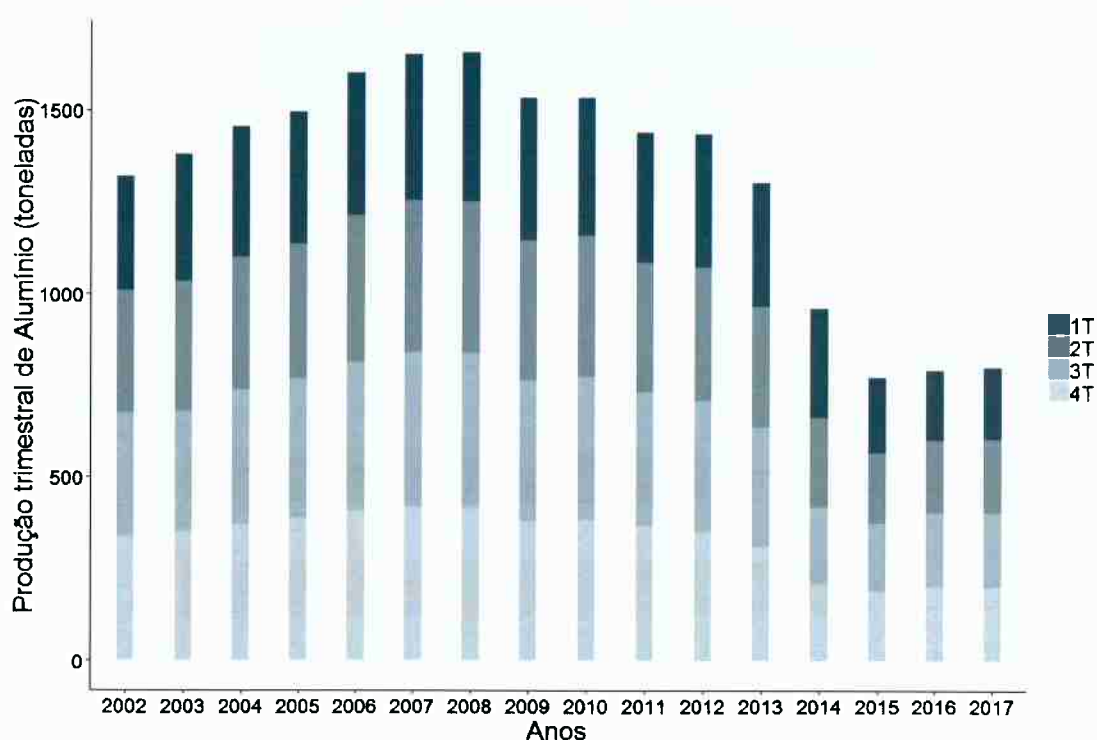
## 5.2 Energia e Produção de Alumínio Primário

O alto custo com a energia elétrica começou a frear a produção de alumínio primário <sup>(51)</sup> e tornou o Brasil um importador de alumínio <sup>(52)</sup>, conforme pode ser percebido na figura 25 <sup>(53)</sup>.



**Figura 25- Exportações e importações brasileiras de alumínio e seus produtos.**

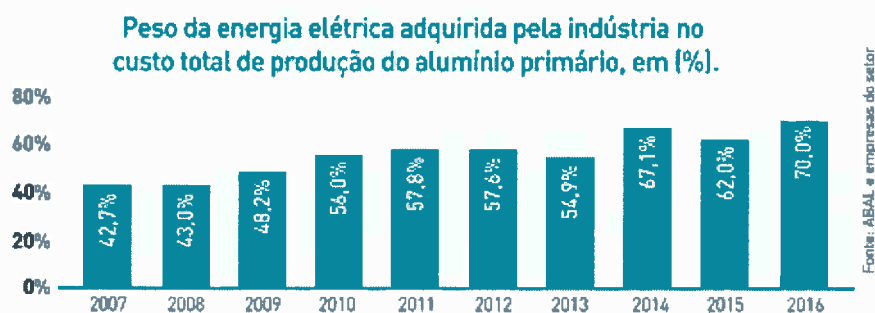
É possível perceber através do gráfico acima que no ano de 2014, o Brasil aumentou 33.4% a importação de alumínio e seus produtos. Foi o primeiro ano, principalmente sentindo o efeito das crises hídricas e energéticas, que o Brasil importou mais alumínio do que exportou. Esses dados condizem com a produção de alumínio no território brasileiro (Fig. 26).



**Figura 26 - Produção trimestral de alumínio por tonelada de 2002 a 2017.**

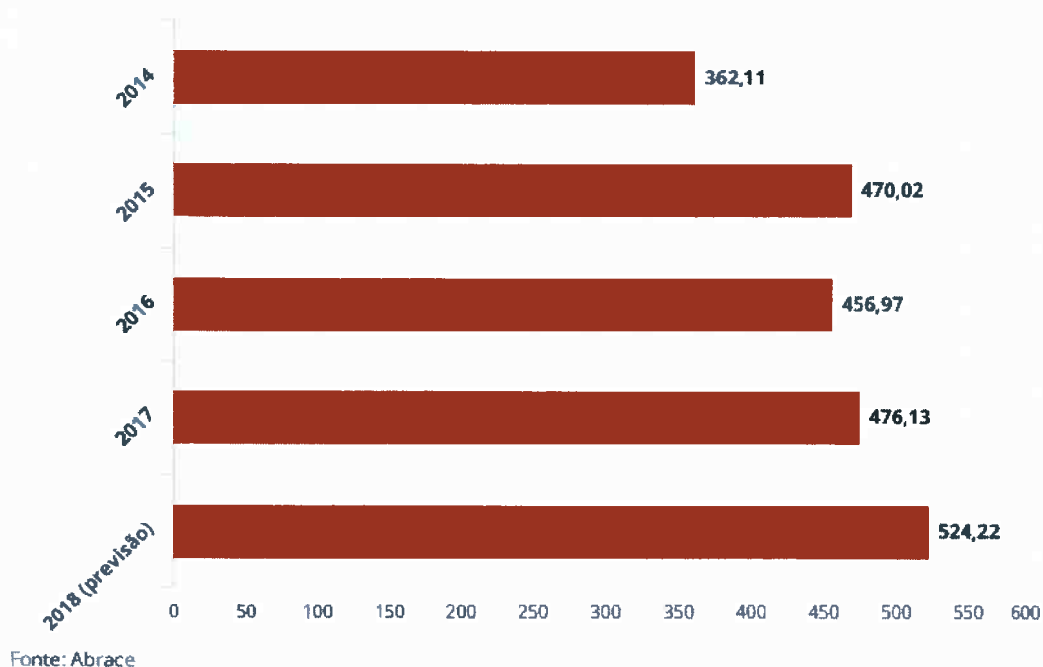
O Brasil, apesar de já demonstrar uma queda na produção de alumínio a partir de 2009, apresentou uma queda considerável em 2014 – quando deixou de ser exportador para ser importador. Nos anos seguintes ainda apresentou queda na produção de alumínio, como consequência das crises hídricas e energéticas. O consumo de energia usado pelas indústrias produtoras de

alumínio primário também teve crescimento considerável em 2014 (Fig. 27), chegando ao pico em 2016.



**Figura 27- Peso da energia elétrica adquirida pela indústria no custo total de produção do alumínio primário, em (%) <sup>(53)</sup>.**

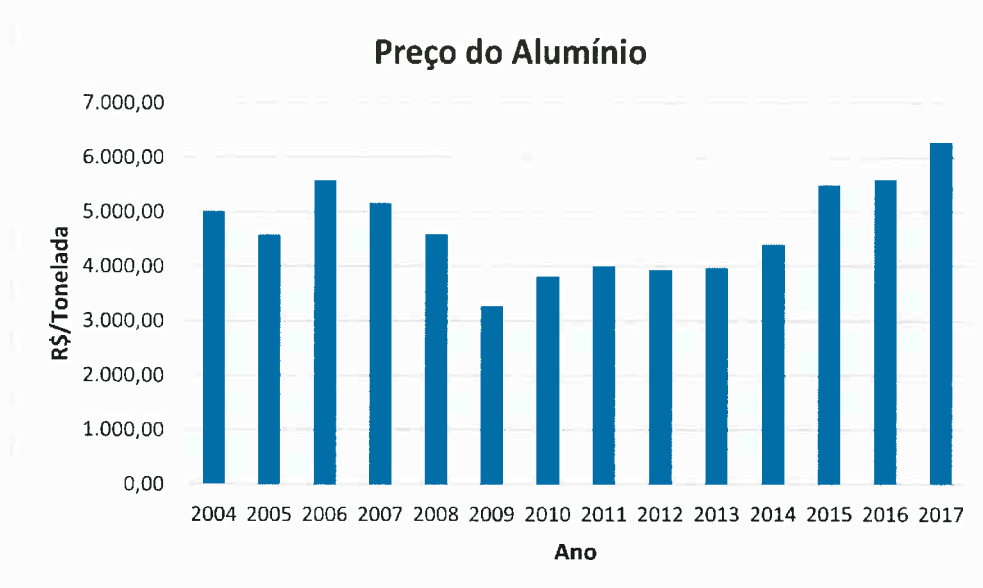
Corroborando com os preços médios nacionais de energia elétrica (Figura 28).



**Figura 28- Preço Médio Nacional da Tarifa de Energia Elétrica. Retirado de <sup>(54)</sup>.**

No início de 2013 foi sancionada a Lei 12.783/2013, pela presidente Dilma Rousseff, que prevê a redução de até 70% no valor das contas de energia elétrica. Em retorno, as empresas responsáveis pela transmissão de energia elétrica ganhavam concessão de contas que estavam para vencer nos anos de 2015 a 2017 <sup>(55)</sup>.

Todos esses fatores supracitados influenciaram no preço do alumínio vendido no Brasil (Fig. 29). Nos anos que antecederam as crises aqui citadas, o preço do alumínio apresentou o patamar mais baixo. Após a crise, o preço do alumínio apresentou um aumento gradativo, iniciando em 2013 e tendo seu pico máximo dos últimos 15 anos em 2017. No ano de 2018 o preço do alumínio teve um aumento de mais de 10% em maio (index), o que demonstra que o aumento gradativo no preço do alumínio ainda continua.



**Figura 29- Preço do alumínio em reais (por tonelada) de 2004 a 2007.**

### **5.2.1 O cenário atual e o futuro do alumínio**

Antes das crises hídrica e energética, o Brasil possuía poucas indústrias produtoras de alumínio <sup>(56)</sup>. Hoje, 32 empresas estão associadas a Associação

Brasileira do Alumínio <sup>(57)</sup>, apesar do recente anúncio da Norsk Hydro ter interrompido toda produção de alumina no Brasil <sup>(58-59)</sup>. A Hydro foi acusada por um relatório realizado pelo Instituto Evandro Chagas por despejar mais de dejetos em um rio, ocasionando um processo liderado pelo Ministério Público, OAB, Ministério do Meio Ambiente, deputados federais e o Governo do Estado do Pará <sup>(59)</sup>.

Outras empresas, como, por exemplo, a Alcoa, já encerraram produção relacionado ao alumínio no Brasil <sup>(60)</sup> e depois voltaram suas atividades. O cenário atual não demonstra muitas perspectivas boas para as empresas voltadas à produção de alumínio no território brasileiro e novas alternativas precisam ser propostas.

Por mais que a reciclagem seja uma perspectiva, uma vez que gasta apenas 5% da energia gasta na produção para reaproveitar o alumínio, as tarifas tributárias excessivas freiam essa alternativa <sup>(61)</sup>.

O alumínio tende a continuar aumentando de preço enquanto o Brasil estiver importando mais do que exportando e ainda sofrendo as consequências das crises hídricas e energéticas.

Apesar do cenário negativo, tanto o Brasil quanto os outros países vêm demonstrando uma maior demanda do alumínio <sup>(62)</sup>. Esta perspectiva é uma boa alternativa para o governo brasileiro, junto com as representantes nacionais do alumínio, como, por exemplo, a Associação Brasileira do Alumínio e a Associação Brasileiro do Minério, apresentarem propostas que possam mudar o cenário do alumínio no Brasil.



## 6 Conclusão

As crises hídrica e energética moldaram o cenário brasileiro em relação à produção de alumínio, principalmente de alumínio primário.

Durante a crise o Brasil deixou, pela primeira vez, de ser exportador de alumínio para ser, predominantemente, importador.

O ano de 2014, que abrangeu a crise hídrica e energética, foi o pior em relação à produção de alumínio para o Brasil. Uma série de fatores em cadeia influenciaram isso. Primeiramente houve um período de seca e de baixa de precipitação que deixou as usinas hidrelétricas em estado de emergência e sem produzir energia. Diante disso, os preços da energia elétrica no Brasil cresceram consideravelmente, assim como o contínuo gasto de água e energia pela população. Isto acarretou duas consequências: a primeira, foi a criação das tarifas “Bandeira Verde, Amarela e Vermelha” com aumento de taxas no valor da energia elétrica; e, a segunda, a diminuição da produção do alumínio primário que tem, por base, uma alta taxa de gasto de energia elétrica para reduzir a alumina em alumínio. A baixa da produção de alumínio, além de fazer o Brasil importar mais alumínio, fez o preço do metal subir no mercado brasileiro.

O Brasil, entretanto, possui boas riquezas naturais que o possibilitam reverter este cenário. Por ser a terceira maior reserva internacional de bauxita – minério com maior número de associação com o alumínio – perdendo apenas para a China e Austrália, e com grande quantidade de rios e usinas hidrelétricas, o Brasil tem as matérias primas para a produção de alumínio primário.

O governo brasileiro necessita apresentar propostas para mudar o cenário do alumínio no mercado interno e no mercado externo. As medidas já tomadas, que incluem redução das tarifas de energia elétrica até investimento de bilhões de reais nas usinas hidrelétricas e no mercado de alumínio, não estão demonstrando suficientes para restabelecer a produção de alumínio em superávit.

No ano de 2018 o preço do alumínio ainda apresentou alta no preço do alumínio que pode ser consequência do mercado e do encerramento das atividades de importantes empresas do mercado do alumínio.

## 7 Referências Bibliográficas

- [1] Shakhashiri, B. Z. **Chemical of the Week: Aluminum**. University of Wisconsin: SciFun. org. 2012.
- [2] Schatzberg, E. **Symbolic culture and technological change: the cultural history of aluminum as an industrial material**. Enterprise & Society. 2003 Jun;4(2):226-71.
- [3] Haraldsson, J. Johansson, M. T. **Review of measures for improved energy efficiency in production-related processes in the aluminium industry–From electrolysis to recycling**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 93, 525-548, 2018.
- [4] Levin, I. & Brandon, D. **Metastable alumina polymorphs: crystal structures and transition sequences**. Journal of the american ceramic society. 1998 Aug; 81(8):1995-2012.
- [5] Drozdov, Andrey (2007). **Aluminium: The Thirteenth Element**. RUSAL Library. ISBN 978-5-91523-002-5.
- [6] Aluminum Association. **Aluminum: properties and physical metallurgy**. ASM International, 1984.
- [7] Bullard III, C. W., & Herendeen, R. A. **The energy cost of goods and services**. Energy policy, 1975: 3(4), 268-278.
- [8] Aquino, T. Fáveri, R. **Caracterização Físico-Química e Mineralógica da Bauxita de Santa Catarina para a Produção de Refratários com Baixo Teor de Óxido Ferro**. In CBECIMat-Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (Vol. 17).
- [9] ABAL (Associação Brasileira do Alumínio). **Bauxita no Brasil: Mineração responsável e competitividade**. 2017. Disponível em:

[http://www.abal.org.br/downloads/ABAL\\_Relatorio\\_Bauxita\\_2017\\_1.pdf](http://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf) Acesso: 04 dez. 2018

[10] Bray, E. L. **Bauxite and alumina**. Survey USG, editor. Mineral commodity summaries. 2008.

[11] Fathi, H. **Bayer's process for alumina production: a historical perspective**. Bull. Hist. Chem, 1995: 17(18), 15.

[12] Constantino, V. R. L., Araki, K., de OSilva, D., & de Oliveira, W. **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático**. Química Nova, 2002: 25(3), 490-498.

[13] Hind, A.R., Bhargava, S.K. and Grocott, S.C. **The surface chemistry of Bayer process solids: a review. Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects**, 1999: 146(1-3), pp.359-374.

[14] Silva Filho, E. B., Alves, M. C. M., & Da Motta, M. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas**. Revista Matéria, 2007: 12(2), 322-338.

[15] Sampaio, J. A. Andrade, M. C. Dutra, A. J. **Bauxita**. CETEM/MCT. 2005.

[16] Haupin, W. E. **Electrochemistry of the Hall-Heroult process for aluminum smelting**. 1983.

[17] BNDES, A. **Indústria do Alumínio—Desempenho Recente e Perspectivas**. Informe Setorial Mineração e Metalurgia, (25). 1999.

[18] Vichi, F. M., & Mansor, M. T. C. (2009). **Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial**. Química Nova, 32(3), 757-767.

[19] Gomes, J. P. P., & Vieira, M. M. F. **O campo da energia elétrica no Brasil de 1880 a 2002**. Revista de Administração Pública, 2009: 43(2), 295-322.

[20] Tolmasquim, M. T., Guerreiro, A., Gorini, R. **Matriz energética brasileira: uma prospectiva**. Novos estudos-CEBRAP, 2007: (79), 47-69.

[21] Goldemberg, J., & Lucon, O. **Energia e meio ambiente no Brasil**. Estudos avançados, 2007: 21(59), 7-20.

[22] Barbosa, E. H. S. **Fabricação e Estudo de um Carneiro Hidráulico de Baixo Custo** (Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte). 2018.

[23] Silva, F. B., & Ferreira, W. R. **Expansão territorial da geração hidrelétrica brasileira**. ENCUESTRO DE GEÓGRAFOS DE AMÉRICA LATINA, 2007: 11, 1-15.

[24] Portal Biossistemas. **O potencial hidrelétrico brasileiro e a maior usina geradora de energia do Mundo**. Disponível em: <http://www.usp.br/portalbiossistemas/?p=7865>. 2018. Acesso em: 04 dez. 2018.

[25] EcoDebate. **Alumínio: Um sorvedouro de energia**. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2009/09/21/aluminio-um-sorvedouro-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 04 dez. 2018.

[26] Haupin, W. **History of Electrical Energy Consumption by Hall-Héroult Cells**. Hall-Héroult Centennial, 2007: 106-113.

[27] Galvão, J. Bermann, C. **Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas**. Estudos Avançados. 2015, Aug; 29(84):43-68.

[28] Cirilo, J. A. **Crise hídrica: desafios e superação**. Revista USP. 2015 Sep 2(106):45-58.

[29] Marengo, J. A., Nobre, C. A., Seluchi, M. E., Cuartas, A., Alves, L. M., Mendiondo, E. M., Sampaio, G. **A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo**. Revista USP, 2015: (106), 31-44.

[30] Monteiro, M. D. A. **Meio século de mineração industrial na Amazônia e suas implicações para o desenvolvimento regional**. Estudos avançados, 2005: 19(53), 187-207.

[31] Júnior, C. **Implantação da Usina Hidrelétrica de Furnas (Mg) e Suas Repercussões: Estudo Sobre a Territorialização De Políticas Públicas**. Artigo baseado na dissertação entregue no Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. 2011.

[32] Retiro Baixo Energética. **Apresentação**. Disponível em: [http://rbe.com.br/rbe/?page\\_id=9](http://rbe.com.br/rbe/?page_id=9) Acessado em: 05 dez 2018.

[33] Gaiotto, M. A. **Aspectos sócio-ambientais dos resíduos na Bacia do Rio Sorocaba-SP: uma contribuição ao desenvolvimento regional do turismo ecológico**. In Congresso brasileiro de ciência e tecnologia em resíduos e desenvolvimento sustentável costão do Santinho, Florianópolis/SC. 2004.

[34] Companhia Energética de São Paulo. **Usina Hidrelétrica Paraibuna**. Disponível em: [http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa\\_UsinaParaibuna?OpenDocument](http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa_UsinaParaibuna?OpenDocument). Acesso em: 05 dez. 2018.

[35] Companhia Energética de São Paulo. **Usina Hidrelétrica Jupia**. Disponível em: [http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa\\_UsinaJupia?OpenDocument](http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa_UsinaJupia?OpenDocument)

[36] O Globo. Com nível do reservatório perto do limite, Usina de Tucuruí abre uma comporta. **O Globo**, Belém, 26 jan. 2010. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/com-nivel-do-reservatorio-perto-do-limite-usina-de-tucurui-abre-uma-comporta-3063179>. Acesso em 05 dez. 2018.

[37] G1. Nível do reservatório de Furnas em Minas Gerais está baixo. **O Globo**. 21 maio 2014. Disponível em: <http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2014/05/nivel-do-reservatorio-de-furnas-em-minas-gerais-esta-baixo.html>. Acessado em: 05 dez. 2018.

[38] G1. Chuvas melhoram nível de Furnas, mas especialistas alertam para risco. **O Globo**. 22 mar. 2016. Disponível em: <http://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2016/03/chuvas-melhoram-nivel-de-furnas-mas-especialistas-alertam-para-risco.html>. Acessado em: 05 dez. 2018.

[39] Salomão, A. Baixo nível de água nas hidrelétricas vai deixar a conta de luz mais cara. **Folha de São Paulo**. 23 set. 2017. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2017/09/1921065-baixo-nivel-de-agua-nas-hidreletricas-vai-deixar-a-conta-de-luz-mais-cara.shtml>. Acesso em: 05 dez. 2018.

[40] G1. Nível da Usina de Furnas no Centro-Oeste de MG opera com o menor volume dos últimos três anos. **O Globo**. 25 jul. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/centro-oeste/noticia/2018/07/25/nivel-da-usina-de-furnas-no-centro-oeste-de-mg-opera-com-o-menor-volume-dos-ultimos-tres-anos.ghtml>. Acesso em: 05 dez. 2018.

[41] Parreiras, M. Seca em Minas Gerais pode ser pior em 2015. **EM Gerais**. 07 jan. 2015. Disponível em: [https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2015/01/07/interna\\_gerais,605447/seg-a-em-minas-gerais-pode-ser-pior-em-2015.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2015/01/07/interna_gerais,605447/seg-a-em-minas-gerais-pode-ser-pior-em-2015.shtml). Acessado em: 05 dez. 2018.

[42] G1. Mais bairros de Sorocaba podem enfrentar racionamento de água. **O globo**. São Paulo, 13 de ago. 2014. Disponível em: <http://g1.globo.com/sao-paulo/sorocaba-jundiai/noticia/2014/08/mais-bairros-de->

[sorocaba-podem-enfrentar-acionamento-de-agua.html](#). Acessado em: 05 dez. 2018.

[43] BELLINI, J. Chuva em excesso deixa represa de Itupararanga com 72% da capacidade. G1, O Globo. São Paulo, 15 jan. 2016. Disponível em: <http://g1.globo.com/sao-paulo/sorocaba-jundiai/noticia/2016/01/chuva-em-excesso-deixa-represa-de-itupararanga-em-estado-de-alerta.html>. Acessado em: 05 dez. 2018.

[44] Nitahara, A. Nível baixo dos reservatórios leva segunda hidrelétrica a parar. **Agência Brasil**. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2015-01/nivel-baixo-dos-reservatorios-leva-segunda-hidreletrica-parar>. Acessado em: 05 dez. 2018.

[45] Elizardo, M. Maior reservatório que abastece o Rio está perto de voltar ao volume morto. **O Globo**. 17 ago. 2018. Disponível em: <http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2015/08/maior-reservatorio-que-abastece-o-rio-esta-perto-de-voltar-ao-volume-morto.html>. Acessado em: 05 dez. 2018.

[46] G1. Usina de Paraibuna volta a gerar energia elétrica após chuvas. **O Globo**. 21 fev. 2015. Disponível em: <http://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2015/02/usina-de-paraibuna-volta-gerar-energia-eletrica-apos-chuvas.html>. Acessado em: 05 dez. 2018.

[47] Costas, R. Custo da energia ameaça frear economia, alertam analistas. **BBC Brasil**. 31 jul. 2014. Disponível em: [https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/07/140721\\_sistema\\_eletrico\\_ru.s.html](https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/07/140721_sistema_eletrico_ru.s.html). Acessado em: 05 dez. 2018.



[48] Agência Nacional de Energia Elétrica. **Bandeiras Tarifárias**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>.

[49] Agência Nacional de Energia Elétrica. **Relatório do Acionamento das Bandeiras Tarifárias**. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/documents/654800/14867739/Relatorio\\_do\\_Acionamento\\_das\\_Bandeiras\\_Tarifarias\\_abril2015-outubro2017.pdf/b447a504-543d-b336-4bfc-b502fd718b0d](http://www.aneel.gov.br/documents/654800/14867739/Relatorio_do_Acionamento_das_Bandeiras_Tarifarias_abril2015-outubro2017.pdf/b447a504-543d-b336-4bfc-b502fd718b0d)

[50] Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. **Plano de Contigência**. São Paulo. Disponível em: [http://www.saneamento.sp.gov.br/Arquivos/Planos/Plano%20de%20Conting%C3%AAnica%20\(datado\).pdf](http://www.saneamento.sp.gov.br/Arquivos/Planos/Plano%20de%20Conting%C3%AAnica%20(datado).pdf)

[51] Instituto Brasileiro de Mineração. **Elevado custo de energia afeta cadeia do alumínio**. 11 set. 2015. Disponível em: [http://ibram.org.br/150/15001002.asp?ttCD\\_CHAVE=253115](http://ibram.org.br/150/15001002.asp?ttCD_CHAVE=253115). Acessado em: 05 dez. 2018.

[52] ABRALATAS. **Custo de energia torna Brasil importador de alumínio**. 05 ago. 2015. Disponível em: <http://www.abralatas.org.br/custo-de-energia-torna-brasil-importador-de-aluminio/>. Acessado em: 05 dez. 2018.

[53] ABAL. **Plano Energético para Indústria de Alumínio no Brasil**. 2017. Disponível em: <http://abal.org.br/downloads/publicacoes/folder-plano-de-energia-2017-port.pdf>

[54] Lis, L. **Conta de luz acumula alta média de 31,5% entre 2014 e 2017**. O Globo. 10 mar. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/conta-de-luz-acumula-alta-media-de-315-entre-2014-e-2017-diz-estudo.ghtml>

[55] Faria, D. M. C. D. **Regulação econômica da geração hidrelétrica: análise da renovação das concessões pela lei 12.783/2013 e propostas de ajuste ao modelo.** (Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo). 2016.

[56] Index Mundi. **Preços de Mercado do Alumínio.** Disponível em: <https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/?mercadoria=alum%C3%ADnio&meses=180&moeda=brl>. Acessado em 05 dez. 2018.

[57] ABAL. **Empresas Associadas.** Disponível em: <http://abal.org.br/abal/empresas-associadas/>. Acessado em 05 dez. 2018.

[58] Reuters. Norsk Hydro anuncia fechamento de toda produção de alumina no Brasil. **Exame.** Oslo. 03 out. 2018. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/negocios/norsk-hydro-anuncia-fechamento-de-toda-producao-de-alumina-no-brasil/>. Acessado em: 05 dez. 2018.

[59] G1. Novo relatório confirma contaminação em fluxos do rio Pará após despejos da Hydro em Barcarena. **O Globo.** Belém, 28 mar. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/pa/para/noticia/iec-confirma-contaminacao-em-fluxos-do-rio-para-apos-despejos-irregulares-da-hydro-em-barcarena.ghtml>. Acessado em 05 dez. 2018.

[60] Estadão. Alcoa suspende produção de alumínio no Brasil e demite 650 no Maranhão. **Época Negócios.** 31 mar. 2015. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/Informacao/Resultados/noticia/2015/03/alcoa-suspende-producao-de-aluminio-no-brasil-e-demite-650-no-maranhao.html>. Acessado em 05 dez. 2018.

[61] Junior, S. I. L. V. A. (2018). **O papel da logística no fluxo operacional de uma empresa de reciclagem de alumínio**. Monografia. Pindamonhangaba-SP: FUNVIC - Faculdade de Pindamonhangaba, 2017. 25f

[62] SANTOMAURO, A. C. **O alumínio é mais que possível**. REVISTA ALUMÍNIO – edição 24. 2010. São Paulo: Segmento MC, 2004-. Trimestral. Disponível em: < <http://www.revistaaluminio.com.br/recicla-inovacao/24/artigo210782-1.asp>>. Acesso em: 27 dez. 2012.