



**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA DO AMBIENTE**

**Trabalho de Licenciatura**

Tema:

**PROPOSTA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE ALUMÍNIO APLICANDO OS  
PROCESSOS DA OXIDAÇÃO CATALÍTICA PARA A PRODUÇÃO DE GÁS  
HIDROGÉNIO (H<sub>2</sub>)**

**Autor:**

Salato, Valter Lourenço

**Supervisor:**

Prof. Doutor António Cumbane, Eng<sup>o</sup>

Maputo, Outubro de 2022



**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA DO AMBIENTE**

**Trabalho de Licenciatura**

Tema:

**PROPOSTA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE ALUMÍNIO APLICANDO OS  
PROCESSOS DA OXIDAÇÃO CATALÍTICA PARA A PRODUÇÃO DE GÁS  
HIDROGÉNIO (H<sub>2</sub>)**

**Autor:**

Salato, Valter Lourenço

**Supervisor:**

Prof. Doutor António Cumbane, Eng<sup>o</sup>

Maputo, Outubro de 2022

**TERMO DE ENTREGA DE TRABALHO DE LICENCIATURA**

Declaro que o estudante finalista **Valter Lourenço Salato**, entregou no dia \_\_\_\_/\_\_\_\_/2022 as \_\_\_\_  
cópias do relatório do seu trabalho de licenciatura com referência: \_\_\_\_\_ intitulado:

**PROPOSTA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE ALUMÍNIO APLICANDO OS PROCESSOS  
DA OXIDAÇÃO CATALÍTICA PARA A PRODUÇÃO DE GÁS HIDROGÉNIO(H<sub>2</sub>).**

Maputo, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2022

A Chefe da Secretaria

---

## **Declaração de honra**

Declaro por minha honra que o trabalho foi realizado com base nos conhecimentos adquiridos ao longo do curso, documentos e referências bibliográficas citadas.

Maputo, Outubro de 2022

O Autor

---

(Valter Lourenço Salato)

## **DEDICATÓRIA**

Dedico especialmente aos meus pais Lourenço Gonçalves Salato e Maria Alice Lufiande Estivo, a minha tia Rasina Rito António, ao meu tio Macário Manuel Armação, aos meus irmãos, aos meus colegas e amigos da Residência Universitária. Pelos ensinamentos no desenvolvimento como pessoa e cognitivo.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço imensamente a Deus, Pois o esforço é necessário. Porém é árduo mais a graça divina completa-o.

Aos meus pais, a minha tia, aos meus tios, aos meus irmãos pelo apoio material e moral, incentivo e acompanhamento que me deram para que eu chegasse até aqui.

De uma forma especial, ao meu supervisor Prof. Doutor António Cumbane, Eng<sup>o</sup> Pela ajuda incansável e pela disposição incondicional desde o início deste trabalho.

Ao corpo docente do Departamento da Engenharia Química da Universidade Eduardo Mondlane, por me terem transmitido conhecimentos científicos e educacionais que estão e estarão sempre na minha memória.

Aos docentes de prática do Departamento da Engenharia Mecânica da Universidade Eduardo Mondlane pelo apoio incansável na montagem do reactor. Em especial a Eng<sup>a</sup> Joana e ao Eng<sup>o</sup> Gil. Aos meus amigos e irmãos da Residência Universitária n<sup>o</sup> 8 da UEM, aos colegas da turma do curso de engenharia do ambiente 2015: Flávio Panguene, Timotio Nordino, Kátia Manjate, Mauro Nhapulo, Ticongolo Chelsea, Jéssica Tembe, Verá Cláudia, Capetine Osvaldo, Massango Marcos, Ivo Tamele, Taniça Mazoio. Como também os outros, Cristiano António Colher, Jacinto Gibante, Michaque Mota, Jéssica Olívia. Sempre estiveram presentes para partilhar informações em momentos de trabalho, para me apoiar e por cultivar em mim um espírito mais trabalhador no percurso académico.

## RESUMO

Em Moçambique, a gestão dos resíduos de embalagem de metal é regulamentada segundo a luz do decreto 83/2014. Estes resíduos encontram-se acondicionados em contentores de lixo sem a observância de segregação ou mesmo podem ser encontrados espalhados no chão, contribuindo para a poluição em diversos locais nas terminais rodoviárias. Este trabalho tem como objectivo geral: Estudar os Processos da Reciclagem de Resíduos de Alumínio (latas de alumínio e o papel de alumínio) para a Produção de Hidrogénio ( $H_2$ ). De um modo específico teve-se em consideração uma abordagem detalhada sobre o surgimento do conceito de resíduos, resíduos de alumínio, descrição de processos envolvidos na tecnologia da reciclagem de resíduos de alumínio. E também fez-se um esboço de um modelo icónico de uma célula de combustível alcalina. Na parte metodológica se fez a avaliação do risco para execução do experimento com segurança, seguido da identificação do caso de estudo: RESÍDUOS DE ALUMÍNIO DA TERMINAL RODOVIÁRIA INTERPROVINCIAL E INTERNACIONAL DA JUNTA, como forma de aprofundar o estudo, faz-se a projecção da população e da produção de resíduos de 2007 a 2035. A posterior, realiza-se a experiência que é constituída por 5 etapas respectivamente: 1<sup>a</sup> Etapa-preparação do material usado, 2<sup>o</sup>etapa-procedimentos experimentais para montagem do reformador de combustível e captação do gás, 3<sup>a</sup>etapa – operação de colecta e triagem, 4<sup>a</sup> etapa - balanço mássico para a composição da alimentação e efluente no reactor, 5<sup>a</sup> etapa - reacção e alimentação do gás na botija, estas etapas foram úteis para execução da experiência 1 e 2. Por conseguinte observou-se uma variação da temperatura de 28°C (301K) para 285°C (558K) com elevado fluxo de formação de hidrogénio e uma rápida velocidade de consumo de 67.5g do reagente limitante em 5min com relação ao 1<sup>o</sup>experimento. Com relação ao 2<sup>o</sup>experimento foram consumidos 20.25g de resíduos a temperatura vária de 27.8°C (300.95K) a 40°C (313.15K) neste experimento foi possível fazer o modelo cinético de formação de hidrogénio e da velocidade de consumo do reagente em 3min. E verifica-se que quanto menor é a temperatura maior é o tempo de indução e quanto maior é a temperatura menor é o tempo de indução. Por fim, no 1<sup>o</sup>experimento alimentou-se a botija com maior dificuldade devido a fuga de gás causado pelo elevado fluxo de gás e variação da temperatura no reactor, contactou-se uma pressão concentrada de -10psi e pressão de saída 2psi de gás hidrogénio na botija. Porém, no 2<sup>o</sup>experimento que durou 3min este foi realizado com sucesso porque foram consumidos 20.25g de resíduos para a produção de 0.005kg de gás há 25°C tendo sido alimentada a botija de forma menos deficitária. Através do gás produzido este projecto ira contribuir muito para melhoria do saneamento e valorização energética do gás hidrogénio nos próximos anos devido ao aumento da produção de resíduos de alumínio.

## ÍNDICE

DEDICATÓRIA.....	II
AGRADECIMENTO.....	III
RESUMO .....	IV
ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS.....	VIII
I. BREVE INTRODUÇÃO A TEMÁTICA .....	1
1.1 OBJECTIVOS.....	2
1.1.1 Objectivo Geral: .....	2
1.1.2 Objectivos Específicos:.....	2
1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....	2
1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	3
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 . Conceitos e Breve Histórico Sobre os Resíduos Sólidos .....	5
2.1.1. Resíduos de Alumínio.....	6
2.1.2. Ecocentro.....	6
2.1.3. Deposição em ecopontos.....	6
2.1.4. Valorização Energética.....	7
2.2 . CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS .....	7
2.2.1. Quanto aos Riscos Potenciais de Contaminação do Meio Ambiente.....	7
2.2.2. Classificação dos Resíduos Produzidos na Reação de Oxidação de Resíduos de Alumínio - de acordo com o anexo IX do decreto 83/2014. ....	7
2.2.3. Factores que Influenciam as Características dos Resíduos Sólidos .....	8
1. Factores climáticos.....	8
2. Épocas do ano especiais.....	9
3. Demográficos .....	9
4. Socioeconómicos.....	9
2.2.4. Aspectos Genéricos de Caracterização dos Resíduos e Dimensionamento do Reactor.....	9
2.2.4.1. Aspectos Genéricos de Caracterização dos Resíduos.....	9
2.2.4.2. Características físicas dos resíduos.....	9
2.2.5. Características Biológicas.....	11
2.2.6. Características Químicas dos Resíduos.....	11
2.2.7. Dimensionamento do Reactor para Reciclagem dos Resíduos.....	11

2.2.7.1. Cinética da reacção .....	12
2.2.7.2. Taxa de formação do produto $Q$ .....	13
2.2.7.3. Taxa de consumo de reagente Limitante .....	14
2.3. PROCESSOS ENVOLVIDOS NA TECNOLOGIA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE ALUMÍNIO PARA OBTENÇÃO DE HIDROGÉNIO ( $H_2$ ) .....	14
2.3.1. Acondicionamento dos resíduos .....	14
2.3.2. REACÇÃO DE OXIDAÇÃO PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS RECOLHIDOS.....	15
2.3.2.1. Reacção de Oxidação de Resíduos de Metais de Alumínio com Base Forte para Obtenção do Hidrogénio ( $H_2$ ).....	16
2.3.2.2. Parâmetros Termodinâmicos da Reação Alumínio-Água em Função da Temperatura & Mecanismo da Reação .....	16
2.4. CÉLULA DE COMBUSTÍVEL .....	20
2.4.1. Princípios de Funcionamento das Células de Combustível.....	21
2.4.2. Classificação das Formas de Operação .....	22
2.4.3. Classificação de Células de Combustível Alcalina.....	22
2.4.4. IMPORTÂNCIA DO HIDROGÉNIO PARA USO NA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL .....	23
2.4.4.1. Constituição da Célula de Combustível .....	24
2.4.4.2. Funcionamento .....	25
2.4.4.3. Prós e Contras da Tecnologia de Célula de Combustível de Hidrogénio.....	26
2.4.5. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE GÁS HIDROGÉNIO ( $H_2$ ) .....	30
III. METODOLOGIA .....	31
3.1. CASO DE ESTUDO: RESÍDUOS DE ALUMÍNIO DA TERMINAL RODOVIÁRIA INTERPROVINCIAL E INTERNACIONAL DA JUNTA.....	31
3.1.1. Avaliação de Risco para a Segurança do Experimento .....	32
3.1.1.1. Nível Probabilidade (NP) .....	33
3.1.1.2. Nível Consequência (NC):.....	34
3.1.1.3. Nível de Risco (NR) ou Grau do Risco (GR) .....	35
3.2. CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS .....	36
Preparação dos materiais usados .....	36
3.2.1. Montagem e Selecção de Um Reactor .....	37
Procedimentos experimentais para montagem do reformador de combustível com condições herméticas e captação do gás.....	37
3.2.2. Recolha de resíduos .....	37
Operação de colecta e triagem (latas de alumínio e papel alumínio) .....	37

3.2.3.	Procedimento Experimental .....	40
	Balanço mássico para a composição da alimentação e efluente no reaktor de 2.5L.....	40
3.3.4.	Reacção de Oxidação do 1ºExperimento .....	40
	Reacção e alimentação do gás na botija .....	40
IV.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	41
4.1.	Reacção de Oxidação do 2ºExperimento .....	42
4.1.1	Resultados do 1º Experimento .....	45
4.1.1.1	Discussão de resultado 1ºExperimento .....	46
4.1.2.	Resultados do 2º Experimento .....	46
4.1.2.1.	Parâmetros Físico-Químicos do Efluente no 2º Experimento .....	47
4.1.2.2.	Potencial Hidrogeniónico (pH) no 2º experimento .....	47
4.1.2.3.	Conductividade:.....	48
4.1.2.4.	Oxigénio.....	48
4.1.2.5.	Cinética no 2º Experimento .....	48
	Gráfico do Consumo da Concentração do Reagente Limitante (CAI)- 2º Exp: .....	50
4.1.2.6.	Velocidade da reacção ( $r_{CA}$ ) de consumo das latas de alumínio.....	50
4.1.3.	Discussão de resultados do 2º Experimento.....	52
V.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	54
5.1	. CONCLUSÕES.....	54
5.2	. RECOMENDAÇÕES .....	55
	BIBLIOGRAFIA .....	56
	ANEXO(A).....	59

## ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

**RSU**→Resíduos Sólidos Urbanos

**FFDU**→Resíduos do fabrico, formulação, distribuição e Utilização

**NM**→Norma Moçambicana

**L A**→Lei do Ambiente

**Cap**→Produção por habitante (Capitação)

**AFCs**→Célula de combustível Alcalina (Alkaline fuel cell)

$e^-$  →Electrão

$P^+$  →Protão

**MJ/Kg** →Mega joule por quilograma

**K** →Constante da velocidade

**Kj** →Quilojoule

**T** → Temperatura

**s** →Segundo

**min** →Minuto

**%** → Percentagem

**H, ΔS** →Variação da entalpia, Variação da Entropia.

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** → Trióxido de alumínio

**r(CAI)** → Velocidade da reacção em função da concentração de Al

**C(Al)** →Concentração de resíduos de alumínio

**d(C Al)/dt** → Diferencial da concentração em função do tempo

**ln(C Al)** → Logaritmo natural da concentração de resíduos

**$\ln(-d(C \text{ Al})/dt)$**  → Logaritmo natural do diferencial da concentração em função do tempo

**Q(mol/s)** → Caudal molar medido em unidades de mol por segundo

**Al<sub>2</sub>** → Resíduo de Alumínio (Alumínio)

**H<sub>2</sub>**→Produto Hidrogénio

**O<sub>2</sub>** →Oxigénio , **H<sub>2</sub>O** →Água

**Na<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub>** → Sal Aluminato de sódio (subproduto)

**NaOH** → Hidroxido de sódio

**E** (entrada)/(Alimentação), **S** (Saida), **G**(Geracao), **C**(consumo)

**AlOH**→Hidróxido de Alumínio

**2NaAl(OH)<sub>4</sub>** → Tetrahidróxi-aluminato de sódio

**AlO(OH)** →Boemita

**μs/cm** → Microsiemens por centímetro (Condutância)

**pH**→Potencial de hidrogénio

**EPI** →Equipamento de proteção individual

**GR**→Grau de risco

**NC** → Nível de consequência

**NP**→Nível de Probabilidade

**ND** → Nível de deficiência

**NE** →Nível de Exposição

**MICOA** → Ministério Para a Cooperação da Accão Ambiental (**MITA**)

**INE** → Instituto Nacional de Estatística

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Contentor de acondicionamento de lixo na via pública.....	15
Figura 2: Etapas da formação de hidrogénio sobre o filme hidratado de óxido de alumínio: (a) Etapa de indução; (b) Etapa de hidratação e crescimento do filme. ....	19
Figura 3:Esquema de funcionamento de uma célula de combustível.....	21
Figura 4:Esquema de uma célula de combustível alcalina. ....	24
Figura 5:Imagem destacada a vermelha localização da Terminal Rodoviário Interprovincial e Internacional da Junta que é o ponto de estudo. (Retirada do Google Earth) .....	31
Figura 6:Contentor de lixo .....	31
Figura 7: Materiais usados no laboratório .....	36
Figura 8:Esquema de um reformador de combustível (reactor) de gás hidrogénio .....	37
Figura 9: Itinerário de recolha das latas de alumínio .....	37
Figura 10: Amostra vinte (20) latas de alumínio recolhidas na Terminal da Junta.....	38
Figura 11: Higienização do reactor e dos resíduos (latas, papel alumínio) .....	38
Figura 12:Operação de segregação de resíduos .....	38
Figura 13: Operação de triagem manual das latas e papel alumínio de acordo com o tamanho.....	39
Figura 14: Armazenamento dos resíduos.....	39
Figura 15:Pesagem de 6,75g de resíduos de alumínio .....	40
Figura 16:Diagrama de balanço mássico para a composição da alimentação e efluente no reactor-2ºExperimento.....	42
Figura 17:Gráfico de Fluxo Molar de Formação do Gás Hidrogénio- 2º Experimento .....	49
Figura 18:Gráfico do consumo da concentração do reagente limitante (CAI)- 2º Experimento .....	50
Figura 19:Gráfico da velocidade da reação de consumo das Latas e papel de alumínio r(CAI) .....	52

## ÍNDICE DE TABELA

Tabela 1: Classificação dos resíduos de Alumínio - De acordo com o Anexo IX do Decreto 83/2014-----	8
Tabela 2:Parâmetros termodinâmicos da reação alumínio-agua em função da temperatura -----	17
Tabela 3:A célula de combustível alcalina e célula de alumínio & oxigênio, temperatura de operação, reações anódicas, catódicas e principais aplicações. -----	23
Tabela 4:Determinação do Nível Probabilidade. -----	34
Tabela 5:Classificação dos diferentes níveis de probabilidade de acontecimento, adaptado -----	34
Tabela 6:Classificação das consequências esperadas.-----	35
Tabela 7:Classificação do Grau de risco. -----	35
Tabela 8:Legenda para Unidade 1-----	43
Tabela 9:Legenda de componente para Unidade 2 -----	43
Tabela 10:Legenda de corrente para Unidade 2-----	43
Tabela 11:Reacção alumínio água valores de pH -----	47
Tabela 12: Condutividade no 2ºExperimento-----	48
Tabela 13: Fluxo Molar de Formação do gás hidrogénio (produto) - 2ºexperimento-----	48
Tabela 14:Consumo da concentração do reagente limitante (resíduo de alumínio) (CAI)- 2ºExp-----	49
Tabela 15:Velocidade da reação (rCA) de consumo do reagente limitante (Latas e papel alumínio), Segundo o método de diferencial de 3 pontos. -----	51

## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1: Produção per capita-----	10
Equação 2: Produção total de RSU -----	10
Equação 3: Volume de RSU produzidos -----	11
Equação 4: Peso específico aparente -----	11
Equação 5:Velocidade da reacção determinada pelo método diferencial-----	13
Equação 6:Diferencial de três pontos para o cálculo da velocidade da reacção -----	13
Equação 7:Taxa de formação do produto-----	14
Equação 8:Taxa de consumo de reagente -----	14
Equação 9: Cálculo do grau de risco-----	33
Equação 10:Velocidade da reação (rCA) de consumo do reagente limitante (lata e papel de alumínio)-----	50

## **I. BREVE INTRODUÇÃO A TEMÁTICA**

A reciclagem de resíduos de alumínio é um processo de tratamento de resíduos, que permite a sua reintrodução no ciclo produtivo. A elaboração deste trabalho consistiu na revisão bibliográfica de vários autores que debruçam sobre resíduos de alumínio e valorização energética, para reaproveitar o produto obtido durante o processo de reciclagem. O gás hidrogénio como produto tem uma densidade energética por massa de  $120 \text{ MJ/Kg}$ . (Alves, 18/05/2017). A conservação do gás em células é extremamente importante, tendo sido discutida nos dias atuais, porem realizou-se o estudo sobre células de combustível como forma de armazenar, e usar estas células para a produção de energia. A parte metodológica começa com a elaboração das condições experimentais, as condições são constituídas por 5 etapas. Neste estudo, para o armazenamento do gás usou-se uma botija de gás de 11kg. E como forma de aplicar o gás para valorização energética considera-se a célula de combustível alcalina (AFCs). A reciclagem de latas de alumínio e papel alumínio proveniente do consumo de refrigerantes, embalagens de alimentos e medicamentos, devera ser efectuada e adequada de forma a obedecer os procedimentos sobre o enquadramento legal da gestão de resíduos sólidos. De modo a minimizar sempre que possível o impacto negativo causado pelos resíduos. A emissão de resíduos de alumínio nas áreas suburbanas da cidade em locais inapropriados sem um tratamento específico. Isto carrega consigo a poluição ambiental.

Visto que o tempo de degradação de um material de alumínio no meio ambiente leva cerca de 200 á 500 anos (Ayello, 2021). Devido a sua resistência a degradação a temperatura ambiente, pode causar problemas da poluição visual, poluição da água, poluição do solo, entupimento das valas de escoamento pluvial, Estes são problemas ambientais que precisão de uma resposta urgente. Facto que associa frequente preocupação das entidades governamentais e não governamentais com o descarte de latas de alumínio, papel alumínio, escórias de alumínio e demais resíduos de alumínio. Nos dias atuais, despertam a busca de soluções para a reciclagem destes resíduos sólidos, os problemas podem, e devem ser reduzidos, por exemplo: propondo sistemas de valorização energética que consiste na reciclagem de resíduos de alumínio para produção de gás (Hidrogénio "H"), para isso, é necessário entender sobre uma célula de combustível, que é um dispositivo estratégico para armazenamento do gás.

## **1.1 OBJECTIVOS**

### **1.1.1 Objectivo Geral:**

- ❖ Estudar os processos da reciclagem de resíduos de alumínio para a produção de hidrogénio ( $H_2$ ).

### **1.1.2 Objectivos Específicos:**

- ❖ Realizar a revisão bibliográfica sobre os procedimentos experimentais envolvidos na reciclagem de resíduos de alumínio para a produção de gás hidrogénio ( $H_2$ );
- ❖ Fazer a seleção e montagem de um reactor para conter a reacção;
- ❖ Recolher e realizar operação de triagem de resíduos sólidos papel e metal;
- ❖ Realizar a experiencia no reactor com soda caustica e resíduos de alumínio;
- ❖ Avaliar os riscos e perigos envolvidos na reacção para alimentação do gás hidrogénio na botija com segurança;
- ❖ Apresentar as discussões de resultados para o 1º experimento e o 2º experimento;
- ❖ Apresentar a conclusão e propor as recomendações.

## **1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA**

Segundo o Plano Estratégico do Sector do Ambiente em Moçambique, o desenvolvimento sustentável de Moçambique passa necessariamente por uma abordagem integrada dos aspectos económicos, sociais e ambientais. Constituem um dos acervos desta documentação a gestão integrada de resíduos sólidos. Sobretudo, para a necessidade de desenvolvimento consta nos aspectos ambientais prioritário sobre o saneamento do meio e água, a promoção de gestão e reciclagem de resíduos. (MICOA, 2005-2015)

Como forma de promover a gestão de resíduos de alumínio, para a produção de gás, este trabalho visa a centrar-se na reciclagem das latas de alumínio, e o papel alumínio, que são descartados na Terminal Rodoviária Interprovincial e Internacional da Junta.

Através do aumento do crescimento demográfico, migrações sazonais, migrações interprovinciais, internacionais, associado ao aumento do poder de compra das famílias.

A geração de resíduos sólidos, concretamente as latas de refrigerantes e papel alumínio para a conservação de produtos alimentares na zona da junta tem vindo a aumentar. Diante do aspecto sobre a promoção da reciclagem de resíduos sólidos indicados, o problema é formulado em torno da questão:

1. O que fazer para reciclar os resíduos de alumínio e reaproveitar para a produção do gás?

### **1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO**

A escolha do tema supra citado, visa a incentivar a reciclagem e a recolha de resíduos de alumínio na cidade de Maputo, para evitar a poluição e arrecadar consigo um benefício marginal a nível local. Concretamente na Terminal Rodoviária Interprovincial da Junta, escolheu-se pelo facto de este ser o local onde há produção de resíduos devido ao crescimento demográfico. Neste sentido, uma valorização destes resíduos para a produção de gás (H<sub>2</sub>) e armazenamento deste gás em células de combustível, que pode ser utilizada na Faculdade de engenharia ou na comunidade como uma nova fonte de energia alternativa, como também, ajudar a comunidade nas zonas suburbanas da cidade a viverem num ambiente limpo e saudável.

## **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

### **(Introdução, Revisão bibliográfica, Identificação do caso de estudo, Metodologia)**

O presente trabalho está dividido da seguinte forma:

- I. Introdução. Neste capítulo, há uma abordagem teórica do tema em estudo, tal como uma breve reflexão do que se pretende fazer, ficando concluído com a apresentação da estrutura do trabalho.
- II. Revisão bibliográfica. Na revisão bibliográfica desenrola todo o fundamento teórico, referentes aos assuntos importantes pretendidos descrever sobre o tema em estudo.
- III. Metodologia. Neste capítulo, procede-se a descrição da metodologia utilizada. Esta consistiu na modelagem de esquemas, realização de experimentos no laboratório, são apresentadas todas as fases de desenvolvimento da mesma.  
Caso de Estudo que é arrolado detalhadamente, tendo em conta vários aspectos que foram determinantes para o estudo, partindo da localização dos locais de estudo e a parte experimental. Que foi determinante para o desenvolvimento do tema.
- IV. Apresentação e discussão de resultados. São apresentados os resultados obtidos através das metodologias utilizadas, adoção de medidas de controlo e comparações dos resultados obtidos.
- V. Conclusão e recomendação. Neste capítulo, São apresentadas as conclusões do trabalho e recomendações de modo a dar continuidade as pesquisas efetuadas no presente trabalho.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Conceitos e Breve Histórico Sobre os Resíduos Sólidos

A pesquisa etimológica do conceito da palavra resíduos permite defini-lo como originário do latim *residuum*, de *residere* que significa ficar assentado no fundo de, ou seja, resto, sobra, sedimento, de onde surge a conotação atual do termo. (Fernando, 2013)

Do ponto de vista semântico, o resíduo é todo material inútil, todo o material descartado, posto em lugar público, tudo aquilo que “se joga fora”, “não presta”. Outra conceituação bastante difusa qualifica o resíduo como sendo as “sobras” do processo produtivo, particularmente as de origem fabril. Segundo Lima (2001) define o resíduo como uma espécie de material heterogêneo inerte ou orgânico, resultante das actividades humanas e da natureza, o qual pode ser parcialmente utilizado, gerando, entre outros aspetos de proteção a saúde, proteção a saúde pública e economia de recursos naturais.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) apresenta a seguinte definição para resíduo: “Qualquer coisa que o proprietário não quer mais, em certo local e certo momento e que não apresenta valor comercial corrente ou percebido”. (Fernando, 2013)

Desde os tempos remotos o homem desfez-se do resíduo que produzia abandonando-o em qualquer local. Situação que incompreensivelmente, ainda hoje é possível presenciar nos países em via de desenvolvimento. Os primeiros problemas surgem com a sedentarização do Homem, quando este começa a agregar em comunidades e a quantidade de resíduo produzido aumenta sendo indispensável encontrar soluções para a eliminação dos resíduos que necessariamente produz como resultado das suas actividades fisiológicas, domésticas.

Do ponto de vista histórico segundo Junkes (2002) o resíduo surgiu no dia em que os homens passaram a viver em grupos, fixando-se em determinados lugares e abandonando os hábitos de andar de lugar em lugar a procura de alimentos ou pastoreados rebanhos. A partir daí processos para eliminação do resíduo passaram a ser motivos de preocupação, embora as soluções visassem unicamente transferir os resíduos produzidos para locais afastados das aglomerações humanas primitivas. (Fernando, 2013)

Já o conceito do Decreto nº 83/2014 de 31 de dezembro, que regulamenta a gestão de resíduos em Moçambique, no seu artigo 1, define resíduo como sendo: substâncias ou objectos que se eliminam, que se tem intenção de eliminar ou que se é obrigado por lei eliminar, também designados por lixo.

O mesmo Decreto define a reciclagem de resíduos, como sendo operação de valorização, incluindo o processamento de materiais orgânicos, através da qual os materiais constituintes dos resíduos são novamente transformados em produtos, matérias ou

substâncias para o seu fim original ou para outros fins. Também define a recolha de resíduos como sendo a operação de colecta, incluindo a triagem e armazenamento preliminar, de resíduos com vista ao seu transporte.

Por sua vez, exemplos de soluções alternativas para a deposição de RSU podem ser citados em 1874, em Nottingham, Inglaterra, surgiu uma tecnologia denominada “o destruidor”, identificado como o primeiro sistema de incineração de rejeitos da Europa. Em 1885, em Nova Iorque, foi construído o primeiro incinerador de resíduos dos Estados Unidos, sendo que em 1914, já havia mais de 300 unidades incineradoras operando. Em torno de 1920, os aterros sanitários tornaram-se uma forma comum de deposição dos resíduos. Em 1954, o estado de Washington, foi o pioneiro a pagar pelo retorno de latas de alumínio. (Fernando, 2013)

### **2.1.1. Resíduos de Alumínio**

Os resíduos de alumínio são resíduos produzidos principalmente a partir de dois fluxos principais, as linhas de produção da indústria de alumínio e o alumínio como produto em fim de vida após o seu uso pelos consumidores.

Em ambos os casos as opções de reciclagem é favorável e amplamente implementadas em muitas partes do mundo desenvolvido. (WastePortal, 2021)

### **2.1.2. Ecocentro**

Um ecocentro é uma instalação onde o cidadão pode colocar resíduos recicláveis que não devem ser colocados nas caixas de lixo comum, nem nos ecopontos. Trata-se de um espaço aberto ao público, onde é possível colocar sem custo os diferentes tipos de resíduos em contentores próprios (Valorsul, 2021). Ou por outra pode ser definido como Centros de reciclagem ou cooperativa de colectores. (CORESAB, 2021)

### **2.1.3. Deposição em ecopontos**

Ecopontos são contentores diversificados (contentor verde, contentor amarelo, contentor azul) para a recolha selectiva de resíduos sólidos urbanos para a posterior reciclagem. O ecoponto azul serve para embalagens de papel, e o verde serve para o depósito de vidros. O ecoponto amarelo destina-se a embalagem de plástico e metal e embalagens de cartão para bebidas. (CORESAB, 2021)

#### **2.1.4. Valorização Energética**

É um processo controlado e automatizado que trata simultaneamente os resíduos indiferenciados termicamente, possibilitando adicionalmente a produção de energia elétrica. Ou seja é um processo que promove a recuperação energética de resíduos. (CORESAB, 2021)

### **2.2. CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS**

São várias as maneiras de se classificar os resíduos sólidos, mas, as formas mais comuns e frequentes usadas para classificar os resíduos sólidos são:

#### **2.2.1. Quanto aos Riscos Potenciais de Contaminação do Meio Ambiente**

Quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente os resíduos produzidos na reação de oxidação podem ser:

- **Classe I** ou **resíduos perigosos** – são aqueles que em função de suas características (inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos ou patogénicos) apresentam risco a saúde pública; e provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.
- **Classe II** ou **não inertes** – São os resíduos (combustível, biodegradáveis ou maior solubilidade) com possibilidade de acarretarem riscos a saúde pública e/ou ao meio ambiente. Não se enquadrando nas classificações de resíduos da classe I-Perigosos e nem na classe III – Inertes. (Graja, 2011)

#### **2.2.2. Classificação dos Resíduos Produzidos na Reação de Oxidação de Resíduos de Alumínio - de acordo com o anexo IX do decreto 83/2014.**

De acordo com o Regulamento sobre a gestão de resíduos perigosos

Cada resíduo tem um código de 6 dígitos 00 00 00:

- Primeiros 2 dígitos – Sector de actividade ou capítulo
- Segundos 2 dígitos – Actividades principais geradoras de resíduos
- Terceiro 2 dígitos – Resíduos.

Nome	Código	Primeiros 2 dígitos	Segundos 2 dígitos	Terceiro 2 dígitos
<b>Latas de alumínio</b>	15 01 04	<b>15 01 04</b> Resíduos de embalagens	15 <b>01</b> 04- Resíduos de embalagens (incluindo resíduos urbanos e equiparados de embalagens, recolhidos separadamente)	15 01 <b>04</b> Embalagens de metal
<b>Resíduos de Hidróxido de sódio e potássio</b>	06 02 04*	<b>06 02 04*</b> - Resíduos de processos Químicos Inorgânicos	06 <b>02</b> 04* Resíduos da FFDU de base	06 02 <b>04*</b> -Hidróxido de sódio e de potássio
<b>Resíduos de Sais</b>	06 03 13*	<b>06 03 13*</b> Resíduos de processos Químicos Inorgânicos	06 <b>03</b> 13*- Resíduos de FFDU de sais e suas soluções e de óxidos metálicos	06 03 <b>13*</b> - Sais no estado sólido e em soluções contendo metais pesados

Tabela 1: Classificação dos resíduos de Alumínio - De acordo com o Anexo IX do Decreto 83/2014

### 2.2.3. Factores que Influenciam as Características dos Resíduos Sólidos

#### 1. Factores climáticos

- Chuvas – Aumento do teor de humidade;
- Outono - Aumento do teor de folhas;
- Verão- Aumento do teor de embalagens de bebidas (latas, vidros e plásticos rígidos);

## **2. Épocas do ano especiais**

-Natal e Ano Novo – Aumento de embalagens e de matéria orgânica;

## **3. Demográficos**

-População urbana – Quanto maior população urbana, maior é a produção per capita;

## **4. Socioeconómicos**

- Nível cultural – Quanto maior o nível cultural, maior a incidência de materiais recicláveis e menor a incidência de matéria orgânica;

- Poder de compra – Maior consumo de supérfluos perto do logo após o salário (fim e início do mês);

-Desenvolvimento tecnológico – Introdução de materiais cada vez mais leves, reduzindo o valor do peso específico aparente dos resíduos.

### **2.2.4. Aspectos Genéricos de Caracterização dos Resíduos e Dimensionamento do Reactor**

#### **2.2.4.1. Aspectos Genéricos de Caracterização dos Resíduos**

A caracterização permite a identificação dos constituintes a serem avaliados, porém deve ser estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem. Esta caracterização dos resíduos consiste em determinar os principais aspetos que podem ser físico-químicos, biológicos, qualitativo e/ou quantitativo das amostras. (MeuResiduo Solucoes Tecnologicas,LTDA, 2021)

Na caracterização dos resíduos os resultados analíticos ajudam a escolher a melhor forma de destinação para o mesmo.

#### **2.2.4.2. Características físicas dos resíduos**

As principais propriedades dos resíduos são a composição gravimétrica, compressividade, teor de umidade, produção per capita, o peso específico. A primeira traduz-se pelo percentual de cada componente em relação ao peso total de resíduo. Os componentes mais utilizados na determinação da composição gravimétrica de resíduos sólidos urbanos variam de acordo com o país. A composição gravimétrica varia conforme o local, hábitos (alimentação e forma de vestir), desenvolvimento económico e o clima. Por exemplo cidades localizadas em países mais desenvolvidos podem gerar menos teor de materiais putrescíveis do que as localizadas em países menos desenvolvidos.

Compressibilidade - também conhecida como grau de compactação ou de redução do volume que uma massa de lixo pode sofrer quando comprimida. A massa de lixo tende a se expandir quando é aliviada da pressão, sem, no entanto, voltar ao volume inicial. A compressibilidade do lixo situa-se entre 1:3 e 1:4 para uma pressão equivalente a 4 kg/cm<sup>2</sup>. Tais valores são utilizados no dimensionamento de equipamentos compactadores;

O teor de umidade – Tem influência decisiva nos processos de tratamento de destinação do lixo, e varia em função das épocas do ano e da incidência de chuva. (Fernando, 2013)

Produção Per Capita - Relaciona quantidade média de resíduos sólidos urbanos (RSU) produzidos por habitante, igual ao quociente entre a produção e a população residente (incluindo a taxa de cobertura de recolha), e pode ser estimada da seguinte forma:

$$ppc = \frac{Q_{RSU}}{Pop \times Tc} \text{ (Kg/dia /hab)}$$

Equação 1: Produção per capita

Onde :

Ppc – Produção per capita [kg/dia/hab]

Q<sub>RSU</sub> – Quantidade de RSU total [kg/dia]

Pop – População total (hab)

Tc – Taxa de cobertura dos serviços de recolha;

(Miezah, 2015)

Produção Total - A produção total de RSU pode ser estimada através do produto da população pela produção per capita, (Miezah, 2015)

$$Q_{RSU} = Pop \times ppc \text{ (kg/dia)}$$

Equação 2: Produção total de RSU

Na determinação da produção total de RSU, condições de cálculo podem ser adoptadas na falta de dados:

Produção per capita de 1kg/dia/hab

Volume de RSU Produzidos - A estimação do volume de RSU produzidos é feito dividindo a produção total de resíduos pela densidade destes. (Levy, 2006)

$$V_{RSU} = \frac{Q_{RSU}}{\rho_{RSU}} \text{ (m}^3\text{/dia)}$$

Onde:

V<sub>RSU</sub> – Volume de RSU [m<sup>3</sup>/dia]

$\rho_{RSU}$  - Densidade de RSU [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Equação 3: Volume de RSU produzidos

Peso Especifico Aparente – É o peso do lixo solto em função do volume ocupado livremente, sem qualquer compactação expressa-se em  $\text{kg}/\text{m}^3$ . A sua determinação é fundamental para definir as dimensões dos equipamentos e de instalações necessárias. (Medeiros, 2002)

$$\rho_{RSU} = \frac{Q_{RSU} \left( \frac{\text{kg}}{\text{dia}} \right)}{V_{RSU} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right)} = \frac{Q_{RSU}}{V_{RSU}} (\text{Kg}/\text{m}^3),$$

Equação 4: Peso especifico aparente

### 2.2.5. Características Biológicas

A principal propriedade biológica dos resíduos é o potencial de biodegradabilidade. Segundo Hamada (2001) citado por Poletto (2010), a biodegradabilidade é frequente determinada pelo conteúdo de sólidos voláteis, determinados pela queima a  $500^\circ\text{C}$ , entretanto, os resultados podem levar a considerações inadequadas, devido a alguns resíduos altamente voláteis não serem biodegradáveis.

### 2.2.6. Características Químicas dos Resíduos

O conhecimento das características químicas dos resíduos possibilita a seleção de processos de tratamento e técnicas de deposição final algumas das características básicas de interesse são: Poder calorífico, pH, composição química.

O poder calorífico indica a quantidade de calor despendida durante a combustão de um quilo de resíduo é dado por  $\text{Kcal}/\text{kg}$ ; e o potencial hidrogeniônico (pH) Indica o teor de acidez ou alcalinidade dos resíduos. Em geral se situa entre 5 a 7, é importante para a selecção dos materiais que se vão usar dos equipamentos de gestão de resíduos (recolha, transporte e transferência) e para os sistemas de protecção ambiental. (Graja, 2011)

Já a composição química consiste na determinação dos teores de cinzas, matéria orgânica, carbono, nitrogénio, potássio, cálcio, fósforo, resíduo mineral total, resíduo mineral solúvel e gorduras. (Graja, 2011)

### 2.2.7. Dimensionamento do Reactor para Reciclagem dos Resíduos

O reformador de combustível em estudo, é um reactor ideal do tipo semi-batch, este pode ser operado numa escala reduzida. Com as seguintes características:

- ☞ Não há fluxo de entrada para o reactor, mas existe fluxo saindo do reactor ou vice-versa (para reacções químicas na fase líquida, o volume varia com o tempo);
- ☞ A composição e a temperatura são idênticas em qualquer posição dentro do reactor; A composição dentro do reactor varia com o tempo. (FOGLER, 2009)

### 2.2.7.1. Cinética da reacção

O projecto de reactores e a cinética química são partes fundamentais da produção de quase todos os produtos químicos industriais. Dessa forma o fracasso ou o sucesso de uma instalação química industrial está directamente ligada á selecção de um sistema de reacção que funcione de forma mais eficiente e segura. (FOGLER, 2009)

A velocidade da reacção refere-se ao consumo de um dado número de moles de qualquer elemento ou composto químico para a formação de uma outra espécie de elemento ou composto químico.

Por forma a fazer-se o balanço molar para o dimensionamento de um reactor específico, deve conhecer-se a dependência da velocidade da reacção sobre a concentração. (FOGLER, 2009)

Neste trabalho a velocidade da reacção é determinada pelo método diferencial numérica, este método permite determinar a ordem da reacção quando uma reacção é irreversível. Considere a seguinte reacção:



A velocidade da reacção ( $r_A$ ) é dada por:  $r_A = K C_A^n$

onde: (n) é a ordem e (K) é a constante da velocidade da reacção;

em que, K é a constante da velocidade,  $C_A$  é a concentração do reagente A

O balanço molar para o reagente A num reactor em batelada (o sinal negativo surge na equação de balanço pelo facto do reagente A ser consumido no processo).

$$-r_A = K C_A^n = -\frac{dC_A}{dt} \text{ Aplicando o logaritmo natural a ambos lados da equação resulta:}$$

$$\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = \ln(K) + n \cdot \ln(C_A)$$

Equação 5: Velocidade da reacção determinada pelo método diferencial

Essa equação é uma recta na qual o coeficiente angular corresponde a ordem da reacção (n) e o coeficiente linear logaritmo natural da constante de velocidade da reacção (ln(K)). Para o cálculo usando o método de diferenciação numérica procede-se da seguinte forma.

1º Passo obtém-se o valor da derivada da concentração do reagente A  $\frac{dC_A}{dt}$  e do logaritmo natural da concentração. Para o cálculo da derivada, utilizar-se-á fórmulas de diferenciação de 3 pontos quando os pontos da variável independente, tempo, são igualmente espaçados.

Fórmulas de diferenciação de 3 pontos:

a) Para o ponto inicial ( $t_0$ ): 
$$\left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_0} = \frac{-3C_{A0} + 4C_{A1} - C_{A2}}{2\Delta t}$$

b) Para os pontos interiores  $t_i$ : 
$$\left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_i} = \frac{C_{A(i+1)} - C_{A(i-1)}}{2\Delta t}$$

c) Para o ultimo ponto ( $t_f$ ): 
$$\left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_f} = \frac{C_{A(tf-2)} - 4C_{A(tf-1)} + 3C_{A tf}}{2\Delta t}$$

Em que  $\Delta t = t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = \dots = t_{i+1} - t_i$

Equação 6: Diferencial de três pontos para o cálculo da velocidade da reacção

2º Passo: Depois do calculo do logaritmo natural, constrói-se o gráfico de  $\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right)$  em função de  $\ln(C_A)$ . (Colli, 2012)

De maneira alternativa, se pode determinar a velocidade ou taxa de reacção a partir da rapidez com a qual os produtos da reacção são formados.

### 2.2.7.2. Taxa de formação do produto $Q = \frac{V}{t}$ onde

V é o volume em (ml)

T é a tempo em (min)

Equação 7:Taxa de formação do produto

A taxa da reação pode ser determinada pela razão entre a variação da concentração do reagente pela variação do tempo, como demonstrado abaixo.

### 2.2.7.3. Taxa de consumo de reagente Limitante

$$Q = - \frac{\Delta n_{\text{reagente}}}{V \Delta t} = - \frac{\Delta[\text{reagentes}]}{\Delta t}$$

Equação 8:Taxa de consumo de reagente

Por convenção, velocidades de reação, taxas de consumo de reagente ou taxas de produção de produtos são sempre reportadas como números positivos, A taxa de reação é afetada pela estequiometria da reação química. (ENEM)

Este trabalho usa um reactor com alimentação e sem efluente ou vice-versa (Semi-Batch).

Um reactor químico é um aparelho ou recipiente para conter e controlar reações químicas..

No projecto de operação de reactores químicos deve-se escolher o tipo de reactor, o modo e condições operacionais, funcionamento e o dimensionamento, de maneira a obter o máximo de lucro (ou rendimento na redução de poluentes), dentro das restrições impostas pela natureza das matérias-primas, pelos custos dos productos, capital de mão-de-obra, das necessidades de segurança, controle de poluição e economia de energia. (FOGLER, 2009)

## 2.3. PROCESSOS ENVOLVIDOS NA TECNOLOGIA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE ALUMÍNIO PARA OBTENÇÃO DE HIDROGÉNIO (H<sub>2</sub>)

As etapas básicas do sistema de gestão de RSU são redução, reutilização, reciclagem, acondicionamento, recolha, transporte, tratamento, deposição final.

**2.3.1. Acondicionamento dos resíduos** – Para Monteiro (2001), acondicionar os resíduos sólidos é prepará-los para a recolha e de forma sanitariamente adequada, de acordo com o tipo e a quantidade dos mesmos. A qualidade da operação de recolha e transporte de resíduos depende da forma adequada do seu acondicionamento e armazenamento e da disposição dos recipientes no local, dia e horários estabelecidos pelo órgão de limpeza urbana para a recolha. A população tem, portanto, participação decisiva nesta operação. A importância do acondicionamento adequado está em:

- Evitar incidentes;
- Evitar a proliferação de vetores;
- Minimizar o impacto visual;
- Reduzir a heterogeneidade dos resíduos (no caso de haver recolha selectiva)

Os conselhos municipais devem fazer um trabalho sistemático de ensino a população para que acondicione corretamente os resíduos produzidos. Ensinando-os sobre o modo adequado de acondicionar resíduos sólidos para a recolha, a correta localização dos recipientes, os horários e locais de recolha, perigo de mau acondicionamento. (Ministério Para Coordenação da Acção Ambiental (MICOA), 2009)

Acondicionamento na via pública – Depende da disponibilidade financeira e do sistema de gestão de resíduos implementados pela entidade gestora dos resíduos, quantidade de resíduos produzidos, segregação na fonte para a recolha selectiva de resíduos, frequência de recolha, condições do local de colocação do contentor, preço do recipiente, tipo de viatura de recolha de resíduos, factor estético.

O acondicionamento na via publica pode ser feito em:

- Pontos de acumulação de recolha de resíduos, contentores, tambores;
- Contentores skip, metálicos: 1m<sup>3</sup>, 2m<sup>3</sup>, 4m<sup>3</sup>, 5m<sup>3</sup>, 6m<sup>3</sup>.

(Celpur-Tecnica Ambiental)



Figura 1: Contentor de acondicionamento de lixo na via pública

### **2.3.2. REACÇÃO DE OXIDAÇÃO PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS RECOLHIDOS**

A reciclagem de resíduos recolhidos envolve processos industriais para transformar o que é resíduo em produto útil. Este passo significa utilizar materiais que se tornariam resíduo ou então no resíduo como matéria-prima para a fabricação de outros materiais novos. No caso de resíduos metálicos e papel que dependem de cada cidade ou comunidade, o processo de reciclagem pode ser visto como uma forma de redução dos custos do sistema de limpeza urbana. Ao reciclar economiza-se matéria-prima, água e energia. (Fernando, 2013)

### 2.3.2.1. Reacção de Oxidação de Resíduos de Metais de Alumínio com Base Forte para Obtenção do Hidrogénio (H<sub>2</sub>)

Metais: Os metais apresentam uma variedade de reacções com base em sua natureza química. Metais são elementos doadores de electrões e portanto possuem uma natureza eletropositiva. Sua reacção com ácidos ou bases depende da sua tendência de reagir como um ácido ou uma base. (Vedantu, 2020)

São bons condutores de calor e electricidade e geralmente são de natureza dura.

Base: A base tem um sabor amargo e é ensaboado ao toque. Uma base torna-se azul de papel de tornassol vermelho. (Ologunde, 2019)

São exemplos de uma base:

Hidróxido de sódio (soda caustica), hidróxido de cálcio, carbonato de sódio (soda de lavagem), cal (óxido de cálcio), hidróxido de potássio (potassa caustica).

Os metais sendo fracamente básicos (devido a sua natureza electropositiva) não reagem com as bases. Mas certos metais são de natureza anfotérica e, portanto, reagem com base para formar sais complexos (contendo mais de um tipo de catiões) e gás hidrogénio é libertado. (Vedantu, 2020)

O alumínio é um metal anfotéricos que reagem com bases como o hidróxido de sódio ou potássio. A reacção pode ser escrita da seguinte forma:

**Reagente -----→ Produto**



Nessa reacção, além do gás hidrogénio, eles produzem também sais que não são muito comuns. Durante a oxidação metálica para a produção de hidrogénio, com foco especialmente na reacção entre alumínio e água. O metal não reage diretamente com a água, pois há uma camada apassivadora de óxido de alumínio sobre a superfície do metal que interrompe a reacção. (Jaime D Holladay, 2009)

### 2.3.2.2. Parâmetros Termodinâmicos da Reação Alumínio-Água em Função da Temperatura & Mecanismo da Reação

Os parâmetros na tabela abaixo foram calculados através de um software termodinâmico HSC:

Tabela 2: Parâmetros termodinâmicos da reação alumínio-água em função da temperatura

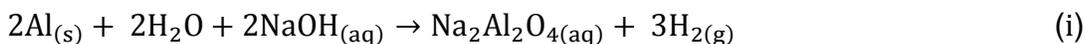
$\frac{2}{3}\text{Al} + 2\text{H}_2\text{O} = \frac{2}{3}\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{H}_2(\text{g})$			
T	$\Delta\text{H}$	$\Delta\text{S}$	$\Delta\text{G}$
°C	kJ/mol H <sub>2</sub>	J/K	kJ/mol H <sub>2</sub>
0	-277	26.2	-284
100	-284	3.29	-285
200	-291	-12.1	-285

(John Petrovic, 2008)

A reação termodinâmica mostrada na tabela indica que o alumínio poderia espontaneamente reagir com água. Porém na prática, uma peça de alumínio deixada na água não irá reagir abaixo das condições da temperatura ambiente. Ou mesmo em uma água fervente devido ao trióxido de alumínio Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (John Petrovic, 2008)

A presença de um álcali forte (normalmente hidróxido de sódio ou potássio) destrói a camada passivadora de óxido metálico, dando continuidade a oxidação do alumínio. No caso do alumínio, conforme SOLER et al (2007) e SOLER et al (2009), as principais reações propostas que ocorrem são as seguintes:

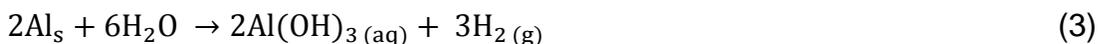
Formação do composto intermediário tetrahidróxi-aluminato de sódio;



Decomposição do intermediário;



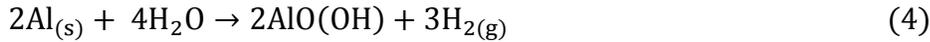
Reação final:



(Bittencourt, 2013)

A reação final é exotérmica e sua variação da entalpia a 298K é igual a -418kJ para cada mol de alumínio. A grande vantagem deste sistema é que o álcali é recuperado ao final do processo, atuando como catalisador. De acordo com Petrovic & Thomas (2008), existem três possibilidades para a formação de hidróxido de alumínio. A primeira apresentada na equação (2) e (3), representa o hidróxido de alumínio na forma de baierita (cuja

estabilidade térmica se estende até a temperatura de 553K). Depois, até aproximadamente 753K, o produto mais estável obtido é a boemita,  $\text{AlO}(\text{OH})$  e, por fim, acima de 753K, o óxido de alumínio não hidratado é o mais estável subproduto obtido. Assim, além da reacção apresentada na equação (3), outras duas reacções são possíveis, representadas nas equações (4) e (5). Conforme Petrovic & Thomas (2008):



(Bittencourt, 2013)

Alguns autores já têm estudado um sistema misto de geração de hidrogénio acoplado a célula de combustível, dentre os quais Wang E. et al (2008), SHKOLNINKOV et al (2008), Existem muitos estudos focados na armazenagem do hidrogénio, tais como o uso de hidretos metálicos e materiais porosos baseados em nanotubos de carbono, nanofibras, carbono ativado e outros compostos poliémicos, conforme citado por TZIAS et al. (2003)

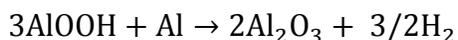
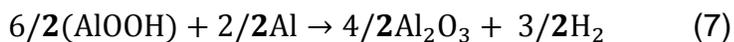
Em um trabalho de 2007, Deng et al. (2007) estabeleceram um modelo matemático de formação de hidrogénio descrita na equação (4), considerando que o processo total ocorre em dois estágios. No primeiro estágio, denominado de indução, os pesquisadores consideraram que ocorre apenas a formação de boemita por meio da hidratação da superfície externa da partícula de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que cobre o alumínio metálico, conforme ilustrado na figura 2 (a). Esta hidratação é representada pela seguinte reacção:



Na etapa de indução, praticamente não ocorre crescimento do filme de óxido sobre a superfície da partícula. Na segunda etapa, após existir uma quantidade suficiente de  $\text{AlOOH}$ , o filme começa a crescer devido a reacção do alumínio com os iões  $\text{OH}^-$  da boemita, gerando mais óxido e hidrogénio, conforme a reacção (7):



Dividindo-se a equação (7) por 2;

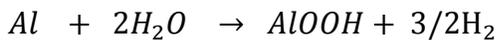
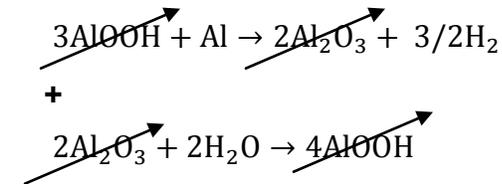


Multiplicando-se a equação (6) por 2;

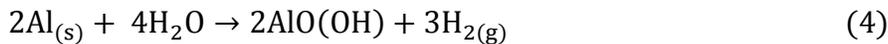




E somando-se as reações resultantes, chega-se á equação (4) dividindo-se por dois.



Equação (4)



Enquanto ocorre difusão do hidrogénio para fora do filme de óxido hidratado ou para dentro da estrutura de alumínio metálico, não ocorre acumulo de gás na interface entre alumínio/ óxido de alumínio, de forma que esta continua a crescer conforme ilustra a figura 2. (b). Todavia quando começa a ocorrer acumulo de hidrogénio na interface, as pequenas bolhas de gás crescerão até estourarem o filme de óxido devido á pressão local acumulada. Assim haverá contacto directo do alumínio com água, favorecendo a reação descrita na equação (4). Entretanto, como a boemita é insolúvel em água, voltará a depositar-se sobre o alumínio, repetindo-se as etapas descritas acima até que o alumínio seja completamente consumido.

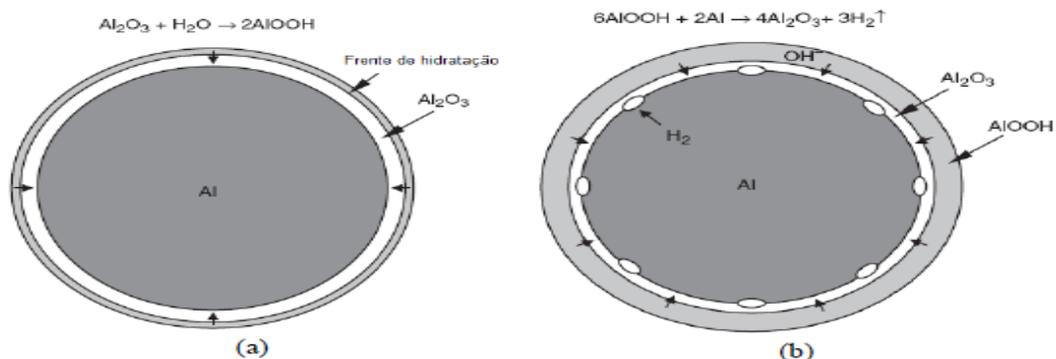


Figura 2: Etapas da formação de hidrogénio sobre o filme hidratado de óxido de alumínio: (a) Etapa de indução; (b) Etapa de hidratação e crescimento do filme.

(Bittencourt, 2013)

Deng et al. (2007) também realizaram experimentos para as temperaturas de 291K, 313K e 323K, obtendo-se maior velocidade de formação de hidrogénio na temperatura de 323K. Estes resultados estão aproximadamente de acordo com Tousi & Szpunar (2013), os quais afirmam que tanto a formação da baierita quanto da gibbsita predominam em temperaturas menores que 343K, ao passo que a boemita (que é o componente que de facto acelera a formação de hidrogénio) tende a predominar em temperaturas mais elevadas. Outro modelo semelhante ao descrito acima para a reacção entre alumínio e água foi proposto por Veder & Bermilyea (1968), onde foram consideradas três etapas reacionais: formação do óxido de alumínio amorfo, dissolução do óxido e precipitação do hidróxido de alumínio. (Bittencourt, 2013)

De acordo com estes autores, a etapa de dissolução do óxido é quase independente do valor do potencial hidrogeniónico (pH) do meio dentro de uma faixa de 1 a 10. Para valores de pH maiores que 10, a velocidade de dissolução aumenta consideravelmente, sendo limitada apenas pela difusão do anião hidroxilo até a superfície. Para valores de pH inferiores que 10, esta velocidade é limitada pela hidrólise da ligação entre os átomos de alumínio e oxigénio da superfície. A natureza da camada de hidróxido também é citada como sendo rica em diferentes configurações de boemita. De acordo com estes autores, a etapa de dissolução do óxido é quase independente do valor do potencial hidrogeniónico (pH) do meio dentro de uma faixa de 1 a 10. Para valores de pH maiores que 10, a velocidade de dissolução aumenta consideravelmente, sendo limitada apenas pela difusão do anião hidroxilo até a superfície. Para valores de pH inferiores que 10, esta velocidade é limitada pela hidrólise da ligação entre os átomos de alumínio e oxigénio da superfície. A natureza da camada de hidróxido também é citada como sendo rica em diferentes configurações de boemita além de outros arranjos amorfo. (Bittencourt, 2013)

#### **2.4. CÉLULA DE COMBUSTÍVEL**

A célula de combustível é um dispositivo que converte energia química em eléctrica e que pode contribuir muito para a geração de energia. (PortalEnergia, 2019)

Células de combustível são dispositivos onde ocorrem oxidação eletroquímica de um combustível, apresentando maior eficiência, segurança e estabilidade do que a maioria dos motores de combustão interna. (Bittencourt, 2013)

A geração de hidrogénio a partir do alumínio possui a vantagem de utilizar-se metal que pode ser completamente recuperado, reciclado e reprocessado. Além disso, refugos feitos à base de alumínio tais como: latas de bebidas; peças de dispositivos eletrónicos; brinquedos; dentre outros, podem ser utilizados para a geração de hidrogénio, o que incentiva a reciclagem de materiais. A geração ocorre com a água na presença de alcalis fortes. (Bittencourt, 2013)

#### 2.4.1. Princípios de Funcionamento das Células de Combustível

A figura abaixo ilustra um modelo simples de célula de combustível de hidrogénio que se aplica bem a maioria dos outros modelos. O dispositivo consiste em um ânodo, um cátodo, um eletrólito. A oxidação do hidrogénio ocorre no ânodo, os eletrões libertados circulam por um circuito externo até o cátodo, onde ocorre a redução do oxigénio. A reacção global é a oxidação do hidrogénio com formação de água. (Bittencourt, 2013)

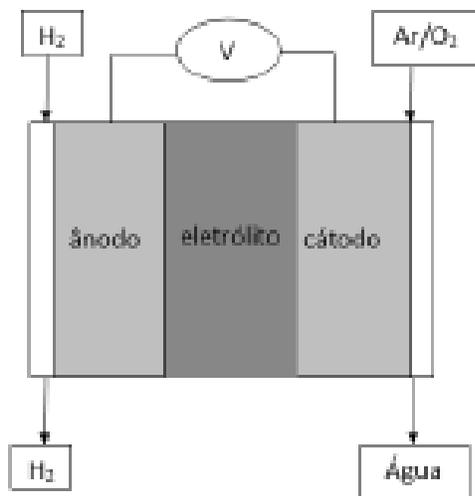


Figura 3: Esquema de funcionamento de uma célula de combustível.

Há uma diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo. Porém a energia eléctrica disponível pode então ser utilizada para realizar trabalho eléctrico. Para que a reacção de oxidação do combustível ocorra é necessário a presença de um catalisador. No caso das células de combustível de hidrogénio, o catalisador mais usado é platina finamente dividida, a qual quebra a molécula de hidrogénio em seus respectivos iões  $H^+$  na reacção de oxidação anódica ( $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ ), com a consequente libertação de electrões. O papel do eletrólito é a condução destes iões  $H^+$  até o cátodo para que ocorra a reacção

com oxigénio o qual sofre redução ( $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ ). Dependendo do tipo de célula empregada o eletrólito pode ser líquido (soluções aquosas alcalinas ou ácidas) ou sólido (membranas poliméricas ou uma combinação de diferentes óxidos e sais)

#### 2.4.2. Classificação das Formas de Operação

Existem diferentes maneiras de classificar célula de combustível. Pode-se classificá-las quanto à temperatura de operação ou quanto ao tipo de eletrólito empregado para o transporte de iões entre ânodo e cátodo. Quanto à temperatura as células são classificadas da seguinte forma descrita a seguir.

- Célula de Hidrogénio-Oxigénio à baixa temperatura: são células que operam em temperaturas inferiores a 373K e pressões inferiores a 5 atm. Normalmente é usado hidrogénio como fonte de energia, e diferentes materiais podem ser usados como eléctrodo, tais como platina, paládio e eléctrodos porosos à base de carbono. No caso de eletrólitos as escolhas limitam-se a eletrólitos aquosos e membranas de troca iónica. Independentemente do tipo de eletrólito usado este deve proporcionar o rápido transporte dos iões  $H^+$  do ânodo em direção ao cátodo.
- **Células de média temperatura:** operam com eletrólitos líquidos numa faixa de temperaturas 423 a 573k e pressões maiores do que a pressão atmosférica. A vantagem em se operar a temperaturas mais elevadas reside no simples facto de que as etapas de reação, difusão e condução de espécies químicas ocorrem mais rapidamente, o que pode ser útil em muitos casos.
- **Células de alta temperatura:** Operam a temperaturas maiores que 573K, chegando até mesmo a valores próximos de 1273K. Estes dispositivos apresentam eletrólitos a base de sais fundidos (mistura de carbonatos de diferentes metais alcalinos) e dióxido de diversos metais. (Bittencourt, 2013)

#### 2.4.3. Classificação de Células de Combustível Alcalina

As células de combustível alcalina podem ser (AFC, Alkaline Fuel Cell); e alumínio-oxigénio (AOFC, Aluminum Oxygen Fuel Cell, onde cita-se um importante estudo de Schwab, (2008).

A tabela abaixo resume esta classificação para a célula de combustível alcalina, que é considerada nesse trabalho. Para melhor fazer a gestão do subproduto resultante da reciclagem das latas de alumínio.

Na tabela mostra-se o tipo de electrólito, temperatura média de operação, iões condutor, reações no ânodo e cátodo, principais aplicações, conforme Beser & Padilia (2003):

Tipo de Célula	Electrólito	Temperatura de operação (K)	Reacção anódica	Reacção catódica	Aplicação
	Íon condutor				
Alcalina	KOH	323 - 473	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$	Transporte, Navegação espacial
	OH <sup>-</sup>				
Alumínio – Oxigénio	KOH	333	$4Al + 12OH^- \rightarrow 4Al(OH)_3 + 12e^-$	$3O_2 + 6H_2O + 12e^- \rightarrow 12OH^-$	Transporte, Comunicações
	OH <sup>-</sup>				

Tabela 3: A célula de combustível alcalina e célula de alumínio & oxigénio, temperatura de operação, reações anódicas, catódicas e principais aplicações.

Fonte: (Ross, 2007)

As células de combustíveis alcalinas, o electrólito utilizado é uma solução concentrada de KOH (85 % peso). Estas células operam a uma temperatura de 70°C. (Ross, 2007)

#### 2.4.4. IMPORTÂNCIA DO HIDROGÉNIO PARA USO NA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL

O hidrogénio que alimenta a célula de combustível é produzido no interior de um reformador de combustível que faz a reciclagem de resíduos de alumínio. A figura abaixo mostra um modelo icónico do funcionamento de uma célula de combustível, esta célula usa hidrogénio como combustível e contém dois eléctrodos, no ânodo tem o eléctrodo de ferro e cátodo tem o eléctrodo cobre.

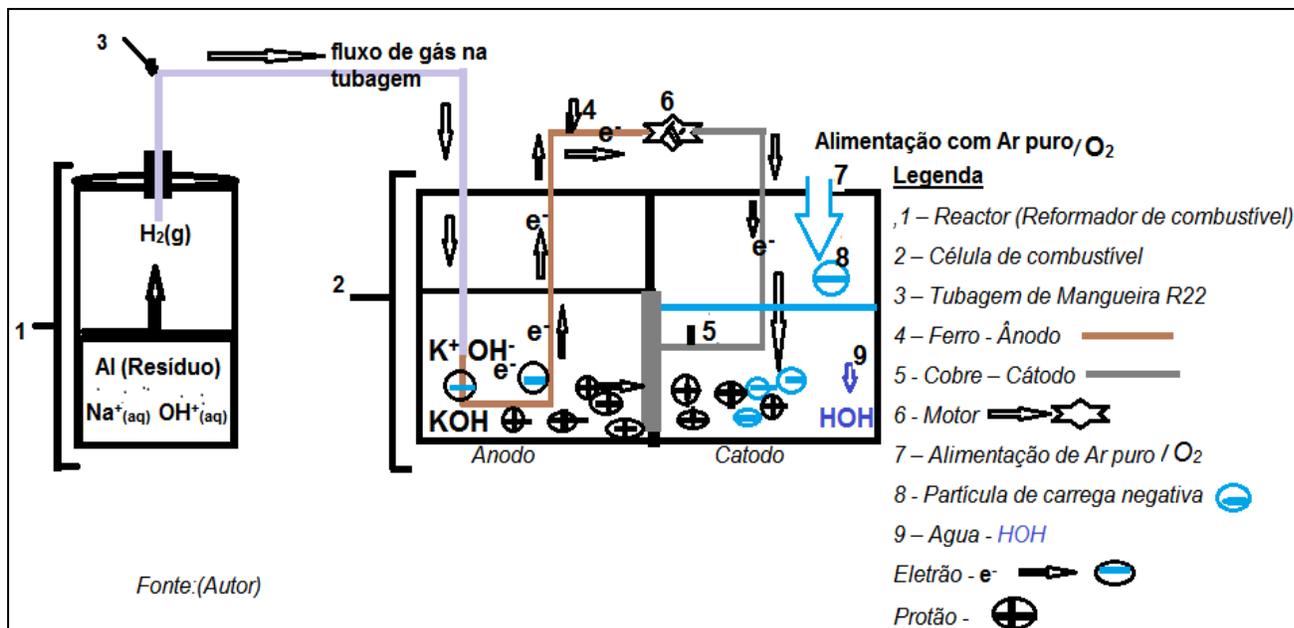


Figura 4:Esquema de uma célula de combustível alcalina.

#### 2.4.4.1. Constituição da Célula de Combustível

A célula de combustível é apenas uma parte de um sistema de célula de combustível padrão completo. Existem três partes principais. Essas três partes principais são o reformador de combustível, a pilha de células de combustível e o condicionador de energia.

1. O reformador de combustível, geralmente por meio de um processo denominado reforma de vapor (o processo acima é um processo que não cria emissões de carbono) isola o hidrogênio puro através da oxidação de resíduos de alumínio (latas, papel alumínio).

Este hidrogênio, é referido como hidrogênio limpo, amigo do ambiente devido à maneira como é criado. Esse hidrogênio é então colocado na pilha de células de combustível.

2. A pilha de células de combustível é qualquer número de células de combustível empilhada para aumentar a produção de energia produzida. A energia criada pela pilha de células de combustível está na forma de corrente contínua.

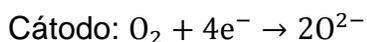
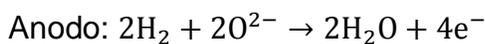
3. O condicionador de energia, ou inversor, é o mecanismo que inverte a corrente contínua produzida pela célula a combustível em corrente alternada. A inversão da corrente contínua em corrente alternada é necessária para o funcionamento da maioria das aplicações de energia. (World Fuel Cell Council)

#### **2.4.4.2. Funcionamento**

Como qualquer outra célula eletroquímica a célula de combustível consiste em dois eletrólitos, o ânodo e o cátodo.

As células de combustível dependem de uma reação química relativamente simples para gerar energia. Embora existam diferentes tipos de células de combustível, todas com suas características únicas, o princípio geral é o mesmo em todas as áreas. Uma célula de combustível é composta de um eletrólito imprensado entre dois eletrodos. Eletrodos são carregados, geralmente por placas de metal. O eletrólito é a substância pela qual os prótons do hidrogênio passam livremente conforme se movem entre os eletrodos. Os eletrólitos são feitos de materiais diferentes e são eles que normalmente dão às células de combustível seus nomes distintos.

A produção de energia começa quando uma corrente de moléculas de hidrogênio é forçada contra o primeiro eletrodo, denominado ânodo, que tem carga negativa. O ânodo força a molécula de hidrogênio a se dividir em prótons e elétrons. Os prótons são puxados através do eletrólito diretamente para o outro eletrodo, chamado cátodo, que é carregado positivamente. Os elétrons, tendo percorrido um caminho diferente ao redor do eletrólito, são capturados e usados como uma corrente elétrica. Esses elétrons, então, se reúnem aos prótons no cátodo, onde ambos são expostos ao oxigênio. O hidrogênio e o oxigênio se combinam para formar água potável pura e um pouco de calor. Frequentemente, por meio de um processo conhecido como cogeração, esse calor residual é capturado e utilizado no aquecimento e resfriamento da instalação onde a célula de combustível está localizada. (World Fuel Cell Council)



Global:  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

### 2.4.4.3. Prós e Contras da Tecnologia de Célula de Combustível de Hidrogénio

Vantagens:

A tecnologia de célula de hidrogénio apresenta várias vantagens sobre outras fontes de energia, tais como:

Renovável e prontamente disponível:

- O hidrogênio é o elemento mais abundante no Universo e, apesar dos desafios associados à sua extração da água, é uma fonte de energia excepcionalmente abundante e renovável, perfeita para nossas futuras necessidades de carbono zero para fontes combinadas de calor e energia; (TWI)

O hidrogênio é uma fonte de energia limpa e flexível para apoiar as estratégias de energia zero carbono:

- As células de combustível de hidrogênio fornecem uma fonte de energia inerentemente limpa, sem impacto ambiental adverso durante a operação, pois os subprodutos são simplesmente calor e água. Ao contrário do biocombustível ou da energia hidrelétrica, o hidrogênio não requer grandes áreas de terra para ser produzido. De fato, a NASA está trabalhando no uso do hidrogênio como recurso com a água produzida como subproduto sendo usada como água potável para os astronautas. Isso mostra que as células de combustível de hidrogênio são uma fonte de combustível não tóxica e, portanto, superior ao carvão, gás natural e energia nuclear, que são potencialmente perigosos ou difíceis de obter. A produção, armazenamento e uso de hidrogênio desempenharão um papel importante na condução do desenvolvimento de energia renovável, equilibrando suas modalidades de fornecimento intermitente com as demandas desafiadoras do usuário final; (TWI)

Mais potente e energeticamente eficiente do que os combustíveis fósseis:

- A tecnologia de célula de combustível de hidrogênio fornece uma fonte de energia de alta densidade com boa eficiência energética. O hidrogênio tem o maior teor de

energia de qualquer combustível comum em peso. O hidrogênio gasoso e líquido de alta pressão tem cerca de três vezes a densidade de energia gravimétrica (cerca de 120 MJ/kg); (TWI)

Altamente eficiente quando comparado a outras fontes de energia:

- As células de combustível de hidrogênio são mais eficientes do que muitas outras fontes de energia, incluindo muitas soluções de energia verde. Esta eficiência de combustível permite a produção de mais energia por libra de combustível. Por exemplo, uma usina de energia convencional baseada em combustão gera eletricidade com 33-35% de eficiência em comparação com até 65% para células de combustível de hidrogênio. O mesmo vale para os veículos, onde as células de combustível de hidrogênio usam 40-60% da energia do combustível, além de oferecer uma redução de 50% no consumo de combustível; (TWI)

Emissões quase zero:

- As células a combustível de hidrogênio não geram emissões de gases de efeito estufa como as fontes de combustíveis fósseis, reduzindo assim a poluição e melhorando a qualidade do ar como resultado; (TWI)

Tempos de carregamento rápidos:

- O tempo de carregamento para unidades de energia de célula de combustível de hidrogênio é extremamente rápido, semelhante ao de veículos convencionais com motor de combustão interna (ICE) e marcadamente mais rápido em comparação com veículos elétricos movidos a bateria. Onde os veículos elétricos requerem entre 30 minutos e várias horas para carregar, as células de combustível de hidrogênio podem ser recarregadas em menos de cinco minutos. Esse tempo de carregamento rápido significa que os veículos movidos a hidrogênio oferecem a mesma flexibilidade que os carros convencionais; (TWI)

Sem poluição sonora:

- As células de combustível de hidrogênio não produzem poluição sonora como outras fontes de energia renovável, como a energia eólica. Isso também significa

que, assim como os carros elétricos, os veículos movidos a hidrogênio são muito mais silenciosos do que aqueles que usam motores convencionais de combustão interna; (TWI)

Sem poluição visual:

- Algumas fontes de energia de baixo carbono, incluindo energia eólica e usinas de biocombustíveis, podem ser uma monstruosidade, no entanto, as células de combustível de hidrogênio não têm os mesmos requisitos de espaço, o que significa que também há menos poluição visual; (TWI)

Longos tempos de uso:

- As células de combustível de hidrogênio oferecem maior eficiência em relação aos tempos de uso. Um veículo movido a hidrogênio tem o mesmo alcance daqueles que usam combustíveis fósseis (cerca de 300 milhas). Isso é superior ao oferecido atualmente pelos veículos elétricos (EVs), que estão sendo cada vez mais desenvolvidos com unidades de energia de células de combustível como 'extensores de alcance'. As células de combustível de hidrogênio também não são afetadas significativamente pela temperatura externa e não se deterioram em climas frios, ao contrário dos EVs; (TWI)

Ideal para uso em áreas remotas:

- Onde as condições locais permitirem, a disponibilidade de hidrogênio por meio de geração e armazenamento local pode ser uma alternativa à energia e aquecimento a diesel em áreas remotas. Isso não apenas reduzirá a necessidade de transporte de combustíveis, mas também melhorará a vida das pessoas que vivem em regiões distantes, oferecendo um combustível não poluente obtido de um recurso natural prontamente disponível; (TWI)

Versatilidade de Uso:

- À medida que a tecnologia avança, as células de combustível de hidrogênio serão capazes de fornecer energia para uma variedade de aplicações estacionárias e móveis. Os veículos movidos a hidrogênio são apenas um exemplo, mas também

podem ser usados em aplicações menores, como produtos domésticos, bem como sistemas de aquecimento de maior escala; (TWI)

Desvantagens:

Extração de hidrogénio:

- Apesar de ser o elemento mais abundante do universo, o hidrogénio não existe sozinho, então precisa ser extraído da água por eletrolise ou separado de combustíveis fósseis de carbono. Ambos os processos requerem uma quantidade significativa de energia para serem alcançados. Essa energia pode ser maior do que a obtida com o próprio hidrogénio, além de ser cara; (TWI)

O investimento necessário:

- As células de combustível de hidrogénio precisam de investimentos para serem desenvolvidas até o ponto em que se tornem uma fonte de energia genuinamente viável. Isso também exigirá a vontade política de investir tempo e dinheiro no desenvolvimento para melhorar e amadurecer a tecnologia. Simplificando o desafio global para o desenvolvimento da energia de hidrogénio ampla e sustentável é a melhor forma de construir incrementalmente a cadeia de oferta e demanda da maneira mais económica; (TWI)

Custo das matérias-primas:

- Metais preciosos como platina e irídio são normalmente necessários como catalisadores em células de combustível e alguns tipos de eletrolisadores de água, o que significa que o custo inicial das células de combustível pode ser alto. Esse alto custo dissuadiu alguns de investir na tecnologia de células de combustível de hidrogénio. Esses custos precisam ser reduzidos para tornar as células a combustível de hidrogénio uma fonte viável de combustível para todos; (TWI)

Armazenamento de hidrogénio:

- O armazenamento e transporte de hidrogénio é mais complexo do que o desejado em combustíveis fósseis. Isso implica adoção de custos adicionais para a consideração de células de combustível como fonte de energia; (TWI)

Infraestrutura:

- Como os combustíveis fósseis são usados há décadas, a infraestrutura para esse fornecimento de energia já existe. A adoção em larga escala da tecnologia de célula de combustível de hidrogénio para aplicações automotivas exigirá uma nova infraestrutura de reabastecimento; (TWI)

Altamente inflamável:

- O hidrogénio é uma fonte de combustível altamente inflamável, o que traz preocupações de segurança compreensíveis. O gás hidrogénio queima no ar em concentrações que variam de 4 a 75%. (TWI)

#### **2.4.5. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE GÁS HIDROGÉNIO (H<sub>2</sub>)**

O hidrogénio é considerado cada vez mais por especialistas como um verdadeiro combustível do futuro. O ponto de ebulição do hidrogénio a uma pressão atmosférica é de -252.8 °C, e o peso específico do hidrogénio liquefeito é 71g/L, o que lhe confere a maior densidade energética por unidade de massa comparativamente aos outros combustíveis, 1kg de hidrogénio contém tanta energia quanto 2,1kg de gás natural ou 2,8kg de petróleo. Esta característica dele, fez do hidrogénio o combustível usado na propulsão e suprimento de energia de espaço nave. Ao contrário de outros combustíveis, como petróleo, gás natural e carvão, o hidrogénio é renovável e não tóxico quando usado em células de combustível. A eficiência energética de hidrogénio e o factor de emissão comparativamente aos outros combustíveis (**vide o anexo A5.1**), e as importantes características do hidrogénio são apresentadas na tabela (**vide o anexo 5.2**).

(Reluca Felseghi, 2019)

### III. METODOLOGIA

#### 3.1. CASO DE ESTUDO: RESÍDUOS DE ALUMÍNIO DA TERMINAL RODOVIÁRIA INTERPROVINCIAL E INTERNACIONAL DA JUNTA

Resíduos de alumínio foram recolhidos na Terminal Rodoviária Interprovincial e Internacional da Junta. A terminal rodoviária interprovincial e internacional da junta localiza-se na cidade de Maputo, na área suburbana do distrito municipal de Nhlamankulo próximo ao Monumento Filipe Samuel Magaia, e esta entre a avenida de Moçambique e a avenida Gago Coutinho.



Figura 5: Imagem destacada a vermelha localização da Terminal Rodoviária Interprovincial e Internacional da Junta que é o ponto de recolha. (Retirada do Google Earth)



Figura 6: Contentor de lixo

Como forma de aprofundar sobre um possível aumento de resíduos (latas e papel alumínio) nos próximos anos, faz-se a projeção da população e da produção de resíduos de 2007 a 2035 na zona de Nhlamankulo (DM2) onde esta a Terminal Rodoviária em estudo. Para o efeito foi necessário saber a distribuição da população. **(Vide o anexo A1.3)**

No que tange a distribuição da população sabe-se que segundo o Instituto Nacional de Estatística (INE), o quadro de distribuição percentual da população da cidade de Maputo ilustra que a população total da cidade de Maputo no ano 2007 foi de 1.111.638 habitantes **(Vide o anexo A1.1)**. Esta população encontra-se desigualmente distribuída em 7 distritos municipais e o distrito municipal de Nhlamankulu (MD 2) apresenta uma densidade populacional de 14.1% do total. (INE, 2007)

Para a projeção da população e da produção de resíduos no distrito municipal de Nhlamankulu (DM2). A zona onde esta alocada a Terminal Rodoviário Inter-provincial e Internacional da Junta usou-se a taxa de crescimento de 1.7%.

Na projeção da quantidade de resíduos, foram retirados do Plano Director de Gestão de RSU na Cidade de Maputo a produção média e a densidade.

O valor da produção média diária na área suburbana é de  $(0.49 \frac{\text{Kg}}{\text{cap} \cdot \text{dia}})$  e a densidade é de  $(0.49 \text{ton}/\text{m}^3)$  **(Vide o anexo A1.2)**. (CMCM, 2007)

### **3.1.1. Avaliação de Risco para a Segurança do Experimento**

Processo de análise de possíveis perdas que podem ser geradas por um determinado perigo usando uma combinação de informações conhecidas sobre a situação, conhecimento sobre o processos subjacentes e julgamento sobre a informação que não é conhecida ou bem compreendida. (Roxo, 2006)

O hidrogénio combustível, armazenado ou produzido por reformador de combustível a bordo, deve oferecer um nível de segurança e facilidade de manuseio equivalente aos combustíveis tradicionais. (Y.Bultel, 2007)

Os aspectos de segurança e os sentimentos dos usuários potenciais sobre isso dependem em grande parte da natureza do combustível. Para o hidrogénio, que é muito mais leve que o ar, estudos mostram que sua dispersão evita qualquer risco de atingir o limite inferior de inflamabilidade em um ambiente não fechado. No entanto, a situação torna-se muito diferente em ambientes confinados (túnel, garagem, e principalmente no interior do veículo) onde esse valor limite pode ser alcançado. (Y.Bultel, 2007)

A chave de análise de risco é a seleção de um modelo de risco correspondente. O modelo selecionado para a análise de risco durante a produção do gás hidrogénio e uso numa célula de combustível é o modelo de M.A.R.A.T (Método de Avaliação de Risco e Acidentes de Trabalho).

Atendendo ao objectivo de simplicidade que se pretende, nesse método não se empregaram os valores reais absolutos de risco, probabilidade e consequências, mas sim os seus níveis:

- Grau de risco (GR);
- Nível de probabilidade (NP);
- Nível de consequência (NC);

No M.A.R.A.T, considera-se que o grau de risco é função da probabilidade de ocorrência do perigo e das consequências esperadas e pode expressar-se como:

$$\mathbf{GR = NP \times NC}$$

Equação 9: Cálculo do grau de risco

#### **3.1.1.1. Nível Probabilidade (NP)**

É determinada em função do nível de deficiência das medidas preventivas e do nível de exposição de risco, ou seja, o nível probabilidade (NP) pode se expressar como produto dos termos nível de deficiência (ND) e nível exposição (NE). Segue se a determinação do nível probabilidade na tabela 3 e na tabela 4 é apresentada a classificação dos níveis de probabilidade:

Tabela 4:Determinação do Nível Probabilidade.

(Cabral, 2012)

		NÍVEL DE EXPOSIÇÃO (NE)			
		4	3	2	1
NÍVEL DE DEFICIÊNCIA (ND)	10	MA 40	MA 30	A 20	A 10
	6	MA 24	A 18	A 12	M 6
	2	M 8	M 6	B 4	B 2

Nível de Probabilidade (NP)		
NP	Valor	Significado
Muito alto (MA)	24 – 40	Situação deficiente com exposição continuada, ou muito deficiente com exposição frequente
Alto (A)	10 – 20	Situação deficiente com exposição frequente ou ocasional, ou então situação muito deficiente com exposição ocasional ou esporádica.
Médio (M)	6 – 8	Situação deficiente com exposição esporádica, ou então situação melhorável com exposição continuada ou frequente.
Baixo (B)	2 – 4	Situação melhorável com exposição ocasional ou esporádica. Não se espera que se materialize o risco, se bem que possa ser admissível.

Tabela 5:Classificação dos diferentes níveis de probabilidade de acontecimento, adaptado

(Cabral, 2012)

### 3.1.1.2. Nível Consequência (NC):

Considera-se 4 níveis para a classificação das consequências, como indicado Na tabela 4. O nível mais baixo (L) é atribuído à consequência menos danosa, e o nível mais alto corresponde à consequência mortal ou catastrófica (M):

Tabela 6:Classificação das consequências esperadas.

Adaptado (Cabral, 2012)

<b>Nível de Consequência (NC)</b>		
<b>Valor</b>	<b>NC</b>	<b>Descrição</b>
		<b>Danos Pessoais/ danos Materiais</b>
<b>100</b>	Mortal ou catastrófica (M)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Um morto ou mais</li> <li>• Destruição total do sistema (difícil renová-lo).</li> </ul>
<b>60</b>	Muito Grave (MG)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesões graves que podem ser irreparáveis</li> <li>• Destruição parcial do sistema (completa e custosa a reparação)</li> </ul>
<b>25</b>	Grave (G)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesões com incapacidade laboral temporária</li> <li>• Requer-se paragem do processo para efetuar a reparação</li> </ul>
<b>10</b>	Leve (L)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequenas lesões que não requerem hospitalização</li> <li>• Reparável sem necessidade de paragem do processo</li> </ul>

### 3.1.1.3. Nível de Risco (NR) ou Grau do Risco (GR)

Após o cálculo do nível de risco, mediante agrupamento dos diferentes valores obtidos através do produto do NP e NC, estabelece-se à sua classificação e o significado do nível de intervenção de acordo com a tabela 7.

Tabela 7:Classificação do Grau de risco.

Adaptado (Cabral, 2012)

<b>Grau de Risco (GR)</b>	<b>Classificação do GR</b>	<b>Actuação Corretiva</b>
600 – 4000	<b>Alto</b>	Situação critica, correcção Imediata
150 -500	<b>Substancial</b>	Correcção Urgente
40 – 120	<b>Moderado</b>	Melhorar se for possível, risco deve ser monitorado
20	<b>Aceitável</b>	Não intervir, salvo se justifique por uma análise mais precisa

Durante os processos de reciclagem de resíduos latas e papel alumínio para produção e armazenamento do hidrogénio os aspectos de segurança foram fundamentais para solucionar os problemas de segurança fez-se anotação dos perigo e riscos envolvidos na actividade segundo o método citado. **(vide no anexo A6)**

### 3.2. CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

As condições experimentais consistiram nas seguintes etapas:

#### Preparação dos materiais usados

- ❖ Reactor semi-batch (reservatório de vidro 2.5L e 1.5L);
- ❖ Equipamentos para condições herméticas no reactor (Rolha, válvula, conector);
- ❖ Equipamentos de laboratório (Elemeyer, bequerel, espátula, placas de petrique, agitador, tubo de ensaio);
- ❖ Equipamentos de calibração (Balança, termómetro, manómetro);
- ❖ Aparelho conductimetro;
- ❖ Mangueira R22 flexível;
- ❖ Bomba de sucção e compressão;
- ❖ Reagentes (Hidróxido de sódio, resíduo de alumínio)
- ❖ Tesoura, martelo, faca;
- ❖ EPI;
- ❖ Recipientes alternativos para higienização, conservação de soluções, estabilização e armazenamento.

As figuras abaixo ilustram os materiais usados para elaboração dos experimentos:



Figura 7: Materiais usados no laboratório

### 3.2.1. Montagem e Selecção de Um Reactor

#### Procedimentos experimentais para montagem do reformador de combustível com condições herméticas e captação do gás

Montou-se uma aparelhagem (Reactor) para a produção de hidrogénio: Recipiente de vidro de 2.5L e de 1.5L, rolha, válvula, mangueira R22, braçadeira. A figura abaixo representa o reformador de combustível:

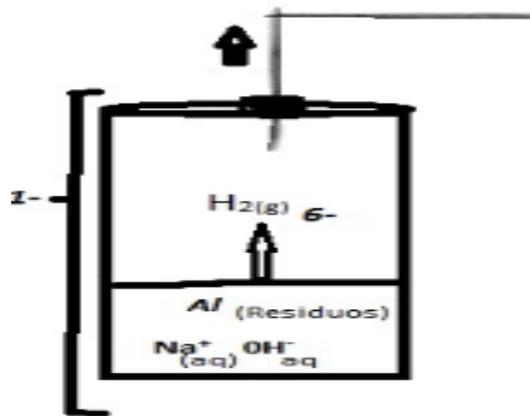


Figura 8:Esquema de um reformador de combustível (reactor) de gás hidrogénio

### 3.2.2. Recolha de resíduos

#### Operação de colecta e triagem (latas de alumínio e papel alumínio)

Os resíduos utilizados neste trabalho, foram recolhidos no Terminal Rodoviário Interprovincial e Internacional da Junta as 6h:00. Durante o processo de recolha obedeceu-se o seguinte itinerário de recolha saindo de casa para o ecocentro da Junta e Junta para a Faculdade depois da Faculdade para casa, tal como ilustra a figura 9 abaixo.



Figura 9: Itinerário de recolha das latas de alumínio

O armazenamento dos resíduos recolhidos evita a sua dispersão. A figura abaixo ilustra o armazenamento de resíduos.



Figura 10: Amostra vinte (20) latas de alumínio recolhidas na Terminal da Junta

As figuras abaixo ilustram a higienização do reactor e das latas de alumínio que foram usadas para efetuar a reacção de oxidação:



Figura 11: Higienização do reactor e dos resíduos (latas, papel alumínio)

A segregação de resíduos é indispensável para a reciclagem. Figura abaixo ilustra a segregação de resíduos de acordo com o tipo papel alumínio e metal:



Figura 12: Operação de segregação de resíduos

A figura abaixo ilustra a operação de triagem de resíduos de acordo como o tamanho:



Figura 13: Triagem manual das latas e papel alumínio de acordo com o tamanho.

A figura abaixo ilustra a colocação de resíduos no saco plástico com vista ao seu armazenamento:



Figura 14: Armazenamento dos resíduos

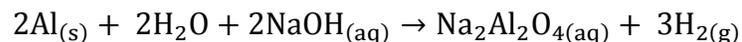
Apos a triagem dos resíduos sólidos (latas de alumínio e papel), redução de tamanhos e pesagem de uma quantidade equivalente de 6,75g de alumínio residual. Segundo o ilustrado na figura 18. Procede-se com a 4ª etapa.



Figura 15:Pesagem de 6,75g de resíduos de alumínio

### 3.2.3. Procedimento Experimental

#### Balanço mássico para a composição da alimentação e efluente no reactor de 2.5L



Segundo a equação balanceada acima, deseja-se fazer a reciclagem de resíduos de alumínio na presença de uma base forte NaOH. A alimentação da unidade1 consiste em uma mistura de 0,1 Kg de base forte, com uma composição de 98% em peso a parte seca e 2% a parte húmida, é adicionado água para obter uma corrente diluída de hidróxido de sódio 60% (NaOH) e o resto é água há 40% (H<sub>2</sub>O). De seguida passa para o reactor onde é adicionado o resíduo de alumínio (lata de alumínio e papel alumínio), para produzir gás Hidrogénio (H<sub>2</sub>) e subproduto na corrente do efluente (E<sub>efluente</sub>). O cálculo de balanço mássico (vide o anexo A2.1)

### 3.3.4. Reacção de Oxidação do 1ºExperimento

#### Reacção e alimentação do gás na botija

Apos a montagem do reactor com condições herméticas e segregação das latas, fez-se o uso da água destilada obtida na faculdade, De seguida preparou-se a solução aquosa de

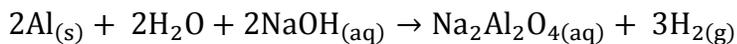
hidróxido de sódio sólido 98% (NaOH), foi dissolvida há uma proporção de 40% de água para 60% de hidróxido. Introduziu-se 100g de NaOH em 63.3ml de água destilada para alimentar o rector de 2.5L.

Introduziu-se na solução preparada (67.5g de resíduo de alumínio) para produzir uma corrente de efluente 0.23kg com a composição de 3% de gás hidrogénio como produto (30L), 10% (H<sub>2</sub>O), 87% de sal aluminato como subproduto na corrente do efluente.

Após o primeiro experimento, preparou-se de novo a solução da água destilada e hidróxido de sódio, reduziu-se a décima parte da quantidade de número de mole de alumínio, de seguida processou-se o **experimento-2**. Tendo sido adicionado no rector 6.75g de resíduo de alumínio para produzir a corrente de efluente 0.17kg com uma composição de gás hidrogénio há 0.44% como o produto e o subproduto sal Na<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> há 12%, 52% (NaOH), 36% (H<sub>2</sub>O), esse experimento foi processado 3 vezes.

#### IV. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Para apresentação e discussão dos resultados obtiveram-se os seguintes dados abaixo. Dados do 1º Experimento:



Foi realizado no rector de 2.5L tendo sido usado hidróxido de sódio (NaOH), vide o diagrama e o balanço mássico no **anexo A2.1**; para a reacção no laboratório foram adicionadas as seguintes quantidades:

Peso do cadinho + NaOH = 148,461g

Peso do (NaOH) = 100g

Volume da água = 63,3ml

Determinação do reagente em excesso e o reagente limitante:

$$n = m/PM$$

$$n(\text{NaOH}) = \frac{100\text{g}}{40\text{g/mol}} = 2.5\text{mol}$$

$$n(2\text{Al}) = \frac{67.5\text{g}}{27\text{g/mol}} = 2.5\text{mol}$$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{63.3\text{g}}{18\text{g/mol}} = 3.52\text{mol} \cong 3.52\text{mol}$$

$$\text{Razão teórica} = \frac{2}{2} = 1 \leftrightarrow (\text{H}_2\text{O}) = 1 * (\text{NaOH}) \quad \text{Razão pratica} = \frac{n(\text{H}_2\text{O})}{n(\text{NaOH})} = \frac{3.52\text{mol}}{2.5\text{mol}} = 1.408$$

$$\leftrightarrow n(\text{H}_2\text{O}) = 1.408 * n(\text{NaOH})$$

A água é 1.408 vezes maior que o hidróxido de sódio.

$$\text{Razão teórica} = \frac{2}{2} = 1 \leftrightarrow (\text{H}_2\text{O}) = 1 * (\text{Al})$$

$$\text{Razão pratica} = \frac{n(\text{H}_2\text{O})}{n(\text{Al})} = \frac{3.52\text{mol}}{2.5\text{mol}} = 1.408 \leftrightarrow n(\text{H}_2\text{O}) = 1.408 * n(\text{Al})$$

A água é 1.408 vezes maior que o resíduo de alumínio.

Razão prática > Razão teórica a água é o reagente em excesso.

$$R_{EX} (\text{Razão de excesso}) = \frac{3.52-2.45}{2.45} * 100\% = 0.44 * 100\% = 44\% \text{ excesso de água}$$

#### 4.1. Reacção de Oxidação do 2º Experimento

Diagrama:

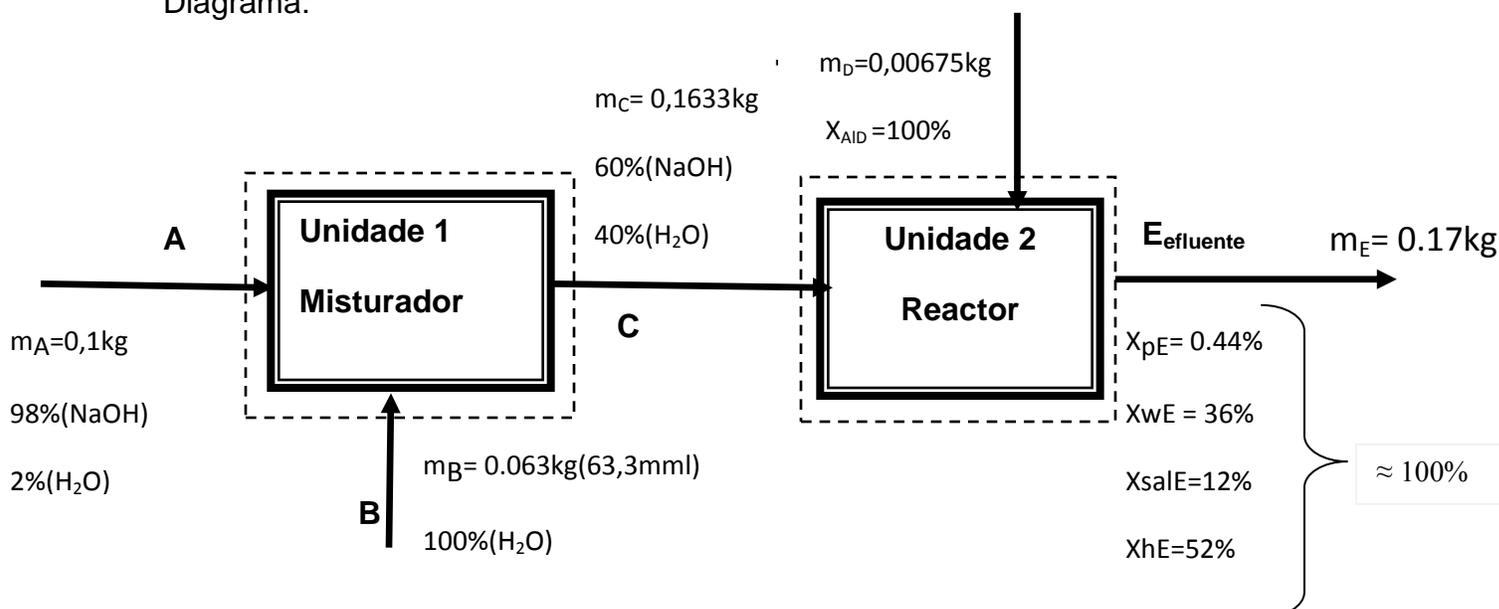


Figura 16: Diagrama de balanço mássico para a composição da alimentação e efluente no reactor-2º Experimento

Fonte: Autor (2021)

**Legenda para Unidade 1 & 2**

<b>Componente U1</b>	
<b>H</b>	Hidróxido de Sódio
<b>W</b>	Água

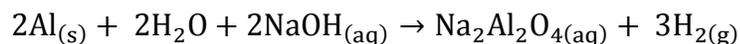
<b>A</b>	Alimentação de hidróxido de sódio com humidade
<b>B</b>	Alimentação de água destilada
<b>C</b>	Efluente do misturador (Solução diluída de hidróxido)

Tabela 8:Legenda para Unidade 1

<b>ComponenteU2</b>	
<b>h'</b>	Solução aquosa de hidróxido de sódio alimentação
<b>Al</b>	Alimentação de residuo de aluminio
<b>P</b>	Efluente hidrogénio produto
<b>S</b>	Resíduo subproduto aluminato de sódio aquoso

Tabela 9:Legenda de componente para Unidade 2

Foi realizado no reactor de 1.5L tendo sido usado hidróxido de sódio (NaOH). Vide o balanço mássico no **anexo A3.1**



Dados do 2º Experimento:

Para a reacção no laboratório foram adicionadas as seguintes quantidades:

<b>Corrente U2</b>	
<b>C</b>	Alimentação da solução diluída de hidróxido
<b>D</b>	Alimentação do óxido de alumínio residual
<b>E</b>	Efluente do reactor (Sal)
<b>F</b>	Efluente do reactor hidrogénio

Tabela 10: Legenda de corrente para Unidade 2

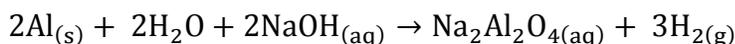
Peso do cadinho1 = 48,454g

Peso do residuo + cadinho1 = 55,2021g

Peso do residuo = 6,7481g  $\cong$  6.75g

Volume da água= 63,3ml

Razão pratica e a razão teórica



$$n = m/\text{PM}$$

$$n(\text{NaOH}) = \frac{100\text{g}}{40\text{g/mol}} = 2.5\text{mol} \quad n(\text{Al}) = \frac{6.75\text{g}}{27\text{g/mol}} = 0.25\text{mol}$$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{63.3\text{g}}{18\text{g/mol}} \cong 3.52\text{mol}$$

**Primeira etapa de reacção**, em que são processados os primeiros 0.25mol de alumínio em 61 segundos.

$$\text{Razão teórica} = \frac{2}{2} = 1 \leftrightarrow (\text{H}_2\text{O}) = 1 * (\text{NaOH})$$

$$\text{Razão teórica} = \frac{2}{2} = 1 \leftrightarrow (\text{H}_2\text{O}) = 1 * (\text{Al})$$

$$\text{Razão prática} = \frac{n(\text{H}_2\text{O})}{n(\text{NaOH})} = \frac{3.52\text{mol}}{2.5\text{mol}} = 1,408 \leftrightarrow n(\text{H}_2\text{O}) = 1,408 * n(\text{NaOH})$$

$$\text{Razão prática} = \frac{n(\text{H}_2\text{O})}{n(\text{Al})} = \frac{3.52\text{mol}}{0.25\text{mol}} = 14,08 \leftrightarrow n(\text{H}_2\text{O}) = 14.08 * n(\text{Al})$$

A concentração molar de água é igual a 14.08 vezes a concentração de resíduo de alumínio;

**Segunda etapa de reacção**, em que são processados os 0.5mol de alumínio em 122 segundos.

$$\text{Razão teórica} = \frac{2}{2} = 1 \leftrightarrow (\text{H}_2\text{O}) = 1 * (\text{Al})$$

$$\text{Razão prática 2} = \frac{n(\text{H}_2\text{O})}{n(\text{Al})} = \frac{3.52\text{mol}}{0.5\text{mol}} = 7,04 \leftrightarrow n(\text{H}_2\text{O}) = 7.04 * n(\text{Al})$$

A concentração molar de água é igual a 7.04 vezes a concentração de resíduo de alumínio;

**Terceira etapa de reacção**, em que são processados os 0.75mol de alumínio em 183 segundos.

$$\text{Razão teórica} = \frac{2}{2} = 1 \leftrightarrow (\text{H}_2\text{O}) = 1 * (\text{Al})$$

$$\text{Razão prática 3} = \frac{n(\text{H}_2\text{O})}{n(\text{Al})} = \frac{3.52\text{mol}}{0.75\text{mol}} = 4.69\text{mol} \leftrightarrow n(\text{H}_2\text{O}) = n(\text{Al})4.69\text{mol}$$

Razão prática > Razão teórica isso indica que alumínio é o reagente limitante.

#### **4.1.1 Resultados do 1º Experimento**

Tabela de resultados do balanço mássico (**vide o anexo A2.2**) No 1º experimento alimentou-se o gás produzido para uma botija, através de uma bomba SUPEREVAC PUMP (**vide o anexo A2.3**)

Com disponibilidade do manómetro, termopar, anotaram-se a pressão no interior da botija, a pressão de saída do gás e a temperatura. (**vide o anexo A2.4**)

$$T_1 = 28^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 285^\circ\text{C}$$

$$P = 2\text{psi (pressão de saída do gás hidrogénio)}$$

$$P = -10 \text{ no vacuo (pressão concentrada)}$$

#### 4.1.1.1 Discussão de resultado 1º Experimento

Com relação ao **1º experimento** observou-se que variação da temperatura de 28°C (301K) para 285°C (558K), essa temperatura foi registada com termopar (**vide o anexo A2.3**), indica que o tempo de indução foi menor o que resultou com elevado fluxo de formação de hidrogénio e uma rápida velocidade de consumo do reagente limitante.

Com relação a variação da pressão de 2psi está é a pressão de saída do gás hidrogénio na botija apos a sua medição com manómetro (**vide o anexo A2.4**), e de -10psi que é a pressão concentrada no vácuo registada com o manómetro.

#### 4.1.2. Resultados do 2º Experimento (anexo A3.3):

Após a reação alimentou-se o gás produzido para uma botija, através da bomba de sucção compressão (**anexo A3.2**), os resultados obtidos foram:

Massa da botija antes da alimentação ( $m_1$ )

Massa da botija depois da alimentação ( $m_2$ )

$$m_1 = 3,535\text{kg} \quad m_2 = 3,54\text{kg}$$

$$T_1 = 27,8^\circ\text{C} = 300,95\text{K} (\text{T do reactor registada com termopar})$$

$$T_2 = 40^\circ\text{C} = 313,15 (\text{T do reactor registada com termopar})$$

$t = 61$  segundos é o tempo para o consumo de 0.125 mol de resíduo (latas de alumínio e papel alumínio) em cada etapa.

$$\Delta m = 3.540 - 3.535 = 0.005\text{kg} = 5\text{g de H}_2$$

#### 4.1.2.1. Parâmetros Físico-Químicos do Efluente no 2º Experimento

Um parâmetro geralmente é qualquer característica que possa ajudar a definir e classificar um determinado sistema. Ou seja, um parâmetro é um elemento de um sistema que é útil, ou crítico ao identificar o sistema. (Lages, 2018)

Os parâmetros físicos são a cor, turbidez, temperatura e odor. A cor é o parâmetro que trata da aparência da água devido aos sólidos dissolvidos, sua alteração pode ser através da presença de iões. (Lages, 2018)

No experimento observou-se uma cor cinzenta, esta cor alterava sempre que a concentração dos produtos aumentava (Autor 2022). A turbidez mede o grau de interferência a passagem da luz causada por sólidos em suspensão. A temperatura avalia a intensidade do calor na água, e a sua importância reside no facto de que elevações de temperatura interferem nas taxas de reações químicas, na solubilidade de transferência de gases. (Lages, 2018)

No efluente, os parâmetros químicos observados são o potencial hidrogeniónico, condutividade e o oxigénio dissolvido.

#### 4.1.2.2. Potencial Hidrogeniónico (pH) no 2º experimento

A reacção alumínio água tem valores de pH variáveis. Os Valor do pH a partir da oxidação do metal até a sua estabilização. São obtidos na tabela abaixo.

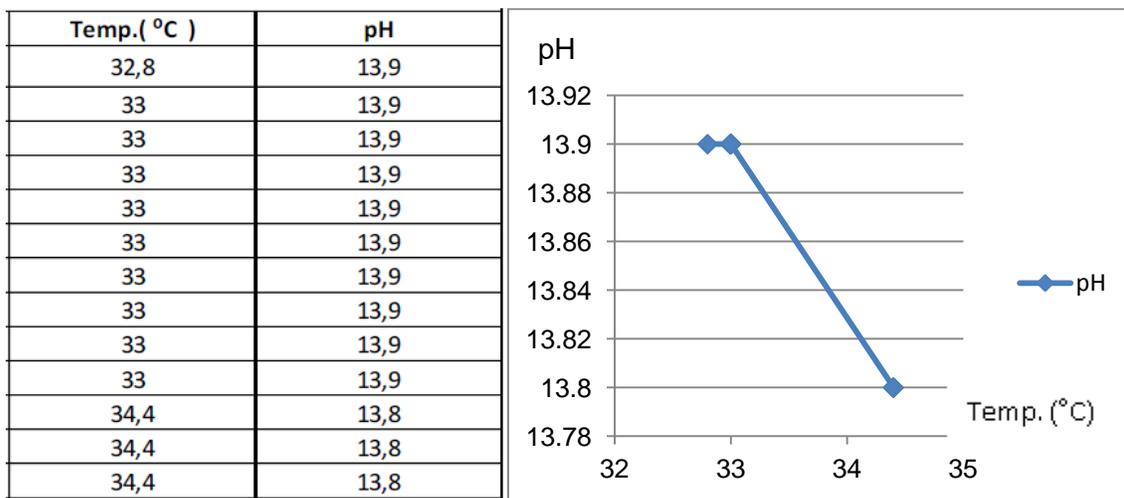


Tabela 11:Reacção alumínio água valores de pH

A tabela 11 os valores de pH 13.9 contem maior velocidade de dissolução de óxido de alumínio do que os valores de pH 13.8.

Fonte: (Carneiro, 2020)

#### 4.1.2.3. Conductividade:

A condutividade elétrica da água é determinada pela presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ânions e cátions e pela temperatura.

À medida que mais sólidos dissolvidos são adicionados, a condutividade específica da água aumenta. Altos valores podem indicar características corrosivas da água. (Barros, 2005)

#### 4.1.2.4. Oxigênio

O O<sub>2</sub> Dissolvido não é um elemento constitutivo da água, mas conserva as suas propriedades oxidantes, quer quando intervêm numa reação oxidativa, por exemplo, com o ferro (puramente química), quer quando, através de fenómenos químicos e eletroquímicos, intervêm nos processos de corrosão dos materiais. (Mendes & Santos, 2004)

Conductividade (µs/cm)	Oxigênio mg/l
106.8	5.75

Tabela 12: Conductividade no 2º Experimento

#### 4.1.2.5. Cinética no 2º Experimento

Está cinético visa a perceber o comportamento da formação do produto no uso da base (NaOH). Para o efeito os dados são mostrados na tabela e no gráfico:

m(H <sub>2</sub> )Kg	Mol de hidrogénio formado H <sub>2</sub> (mol)	t(s)	Fluxo molar de hidrogénio QH <sub>2</sub> (mol/s)
0	0	0	0
0.00075	0.375	61	0.0061
0.0015	0.75	122	0.00615
0.00225	1.125	183	0.00615

Tabela 13: Fluxo Molar de Formação do gás hidrogénio (produto) - 2º experimento

Gráfico de Fluxo Molar de Formação do Gás Hidrogénio (Produto) em função do tempo- 2º Experimento:

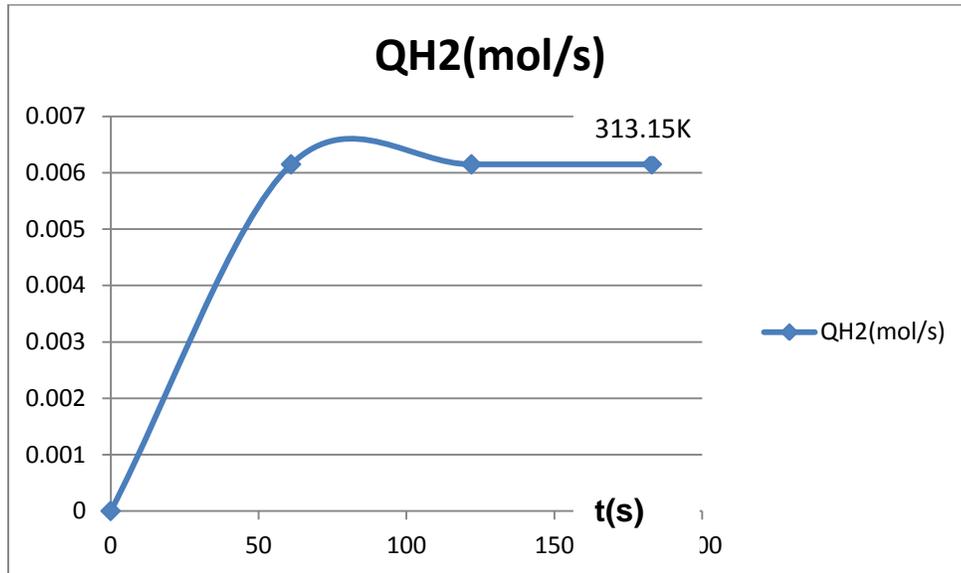


Figura 17:Gráfico de Fluxo Molar de Formação do Gás Hidrogénio- 2º Experimento

Cinética de Consumo do Reagente Limitante<sup>1</sup> em Função do Tempo: Esta cinética visa a perceber o comportamento do consumo de latas e papel alumínio no uso da base (NaOH). Para o efeito os dados são mostrados na tabela e no gráfico:

V(H2O)L	t(s)	C(Al)(mol/L)	n(Al)mol
0.065	0	11.5	0.75
0.061	61	8.2	0.5
0.056	122	4.4	0.25
0.052	183	2.4	0.125

Tabela 14:Consumo da concentração do reagente limitante (resíduo de alumínio) (CAI)- 2ºExp

<sup>1</sup> Latas de alumínio e papel de alumínio

<sup>2</sup> Diferencial de três (3) pontos obtém-se pela fórmula de diferencial de 3 pontos, é usada quando os pontos da variável independente tempo são igualmente espaçados.

Gráfico do Consumo da Concentração do Reagente Limitante (CAI)- 2º Exp:

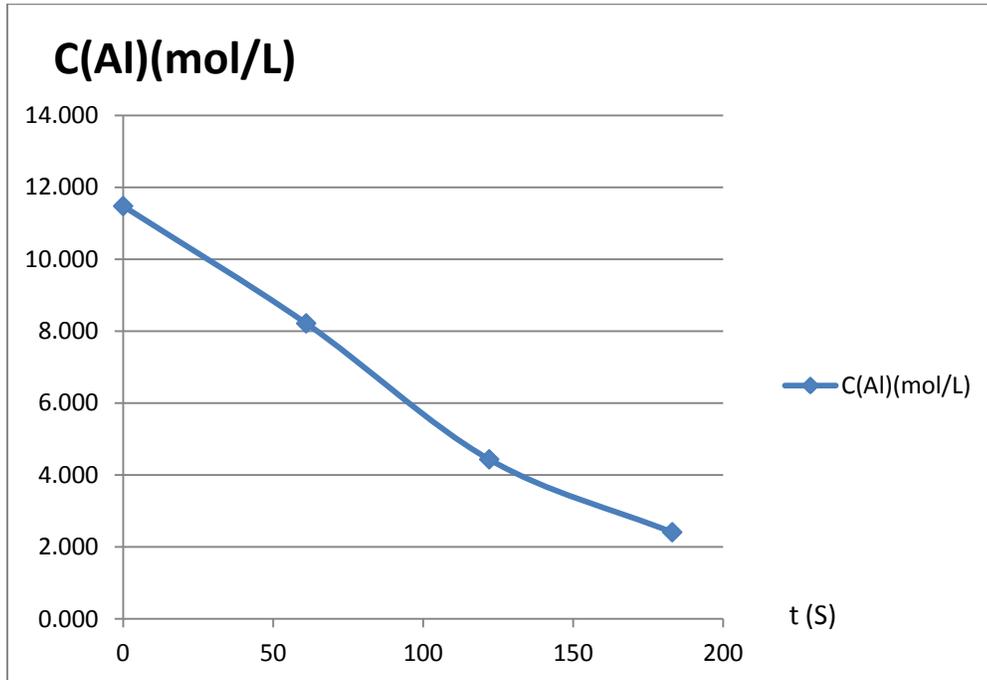


Figura 18:Gráfico do consumo da concentração do reagente limitante (CAI)- 2º Experimento

#### 4.1.2.6. Velocidade da reação ( $r_{CA}$ ) de consumo das latas de alumínio

A velocidade da reacção do balanço molar para o reagente (resíduos de alumínio) num reactor em batelada pode ser dada pela expressão:

$r_A = K C_A^n$  Onde: K é a constante da velocidade,  $C_A$  é a concentração do reagente A e

(n) é a ordem.

$$\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = \ln(K) + n \cdot \ln(C_A) \leftrightarrow Y = b + aX$$

$$Y = 0.6193X - 0.197$$

$$\ln(K) = -0.197 \leftrightarrow K = e^{-0.197}$$

$$K = 0.82; n = 0.6193 \cong 1$$

$$r_{C_A} = -0.82C_A$$

Equação 10:Velocidade da reação ( $r_{CA}$ ) de consumo do reagente limitante (lata e papel de alumínio)

A tabela abaixo ilustra o cálculo da cinética segundo o método diferencial de três pontos no tempo inicial ( $t_0$ ), tempo intermediário ( $t_i$ ), e tempo final ( $t_f$ ).

<b>t(min)</b>	<b>d(C Al)/dt</b>	<b>ln(CAI)</b>	<b>ln(-d(C Al)/dt)</b>
0	$\left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_0} = \frac{(-3 * 11.5 + 4 * 8.2 - 4.4)}{2 * (1.02 - 0)}$ $\left(\frac{-3C_{A0} + 4 * C_{A1} - C_{A2}}{2 * \Delta t}\right) = -2.95$	2.44	1.082
1.02	$\left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_i} = \frac{C_{A(i+1)} - C_{A(i-1)}}{2 * \Delta t} = \frac{(4.4 - 11.5)}{2 * (2.03 - 1.02)} = -3.46$	2.11	1.24
2.03	$\left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_i} = \frac{C_{A(i+1)} - C_{A(i-1)}}{2 * \Delta t} = \frac{(2.4 - 8.2)}{2 * (3.05 - 2.03)} = -2.86$	1.5	1.05
3.05	$\left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_f} = \frac{C_{A(tf-2)} - 4 * C_{A(tf-1)} + 3 * C_{A tf}}{2 * \Delta t} =$ $\frac{(8.2 - 4 * 4.4 + 3 * 2.4)}{2 * (3.05 - 2.03)} = -1.1$	0.88	0.12

Tabela 15: Velocidade da reação ( $r_{CA}$ ) de consumo do reagente limitante (Latas e papel alumínio), Segundo o método de diferencial de 3 pontos<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Diferencial de três (3) pontos obtém-se pela fórmula de diferencial de 3 pontos, é usada quando os pontos da variável independente tempo são igualmente espaçados.

Neste gráfico o declive da recta é a ordem da reacção. Gráfico da Velocidade da Reacção de Consumo do Reagente Limitante (rCAI) ajustado a uma regressão linear:

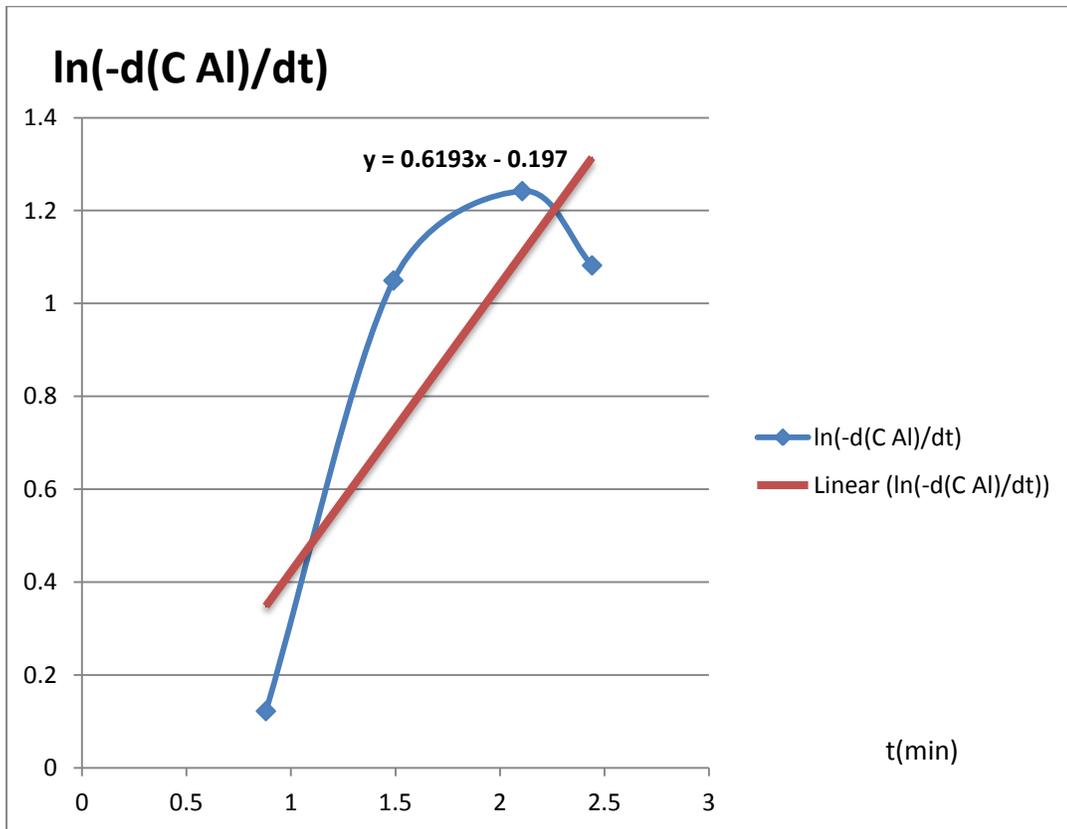


Figura 19: Gráfico da velocidade da reacção de consumo das Latas e papel de alumínio r(CAI)

#### 4.1.3. Discussão de resultados do 2º Experimento.

Neste experimento conforme a figura 17 verifica-se que o gráfico do fluxo molar de formação do gás hidrogénio em função do tempo (61s á 183s) mostra que há um pequeno atraso entre o ponto inicial e o valor do segundo ponto experimental. Este atraso é denominado de período de indução, e esta directamente ligado ao tempo que o catalisador (NaOH) leva para destruir a camada passivadora de óxido de alumínio.

Este comportamento também foi verificado por Soler et al (2009), Carrier et al (2007) e Deng et al. (2007), que o justificam como o período de tempo em que ocorre a hidratação da camada de  $Al_2O_3$  e sua posterior dissolução tornando assim a superfície do alumínio activa para reagir com água. (John Petrovic, 2008)

Com relação a temperatura de 313.15K verifica-se que também quanto menor é a temperatura maior é o tempo de indução. E quanto maior é a temperatura menor é o tempo de indução.

Em relação ao gráfico da fig. 18 verifica-se que a concentração de resíduos de alumínio vai reduzindo com o tempo. Ao passo que a concentração molar de hidrogénio vai aumentar com o tempo até atingir um pico isto é ilustrado segundo o gráfico da fig 17. O gráfico da figura 19 mostra que o coeficiente angular é a ordem da velocidade de formação do hidrogénio e é igual a  $0.619 \cong 1$ . E a constante da velocidade é o coeficiente linear da equação linear ajustada, sendo assim o valor de K é igual a 0.82.

## V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1. CONCLUSÕES

Chegado o fim do trabalho conclui-se que no primeiro experimento após a produção de gás alimentou-se a botija com maior dificuldade devido a fuga de gás no reactor.

Contatou-se a pressão de -10 psi de gás e a pressão de saída de 2psi de gás hidrogénio na botija, durante a emissão do gás hidrogénio a temperatura do termopar reduzia a cada segundo e demorou 5min para o consumo de 67.5g (2.5mol) de resíduo de alumínio. Porque passados 5min observaram-se fissuras na base do reactor de 2,5l. Este fenómeno é clarificado devido a elevada temperatura de 28°C (301K) para 285°C (558K) e um elevado fluxo de gás com curto tempo de destruição da camada de apassivadora das latas de alumínio e papel alumínio.

Em torno do 2º experimento a reciclagem de resíduos de alumínio para a produção de gás hidrogénio no reactor de 1.5l foi realizada com sucesso durante 3min para o consumo de 20.25g (0.75mol) de resíduo de alumínio, neste experimento havia uma redução de 0.25mol (6.75g) de resíduo cada 61s. Este foi demorado oferecendo menor dificuldade para alimentação de gás na botija comparativamente ao primeiro experimento, foi realizado adotando-se todas as medidas de segurança. Tendo sido alimentada a botija de 11kg até conter um peso de 0.005kg de gás hidrogénio á 25°C. Esta quantidade é clarificada pelo facto da botija não apresentar condições herméticas para o armazenamento do gás hidrogénio, este problema pode ser solucionado com a valorização energética do gás hidrogénio na célula de combustível alcalina (AFCs).

Contudo, se entende que a reciclagem de latas de alumínio e papel alumínio na zona da Terminal Rodoviária Internacional e Interprovincial da Junta irá contribuir para a melhoria do saneamento e a valorização energética do gás hidrogénio nos próximos 14 anos, devido ao aumento da produção da quantidade de resíduos de alumínio.

## 5.2. RECOMENDAÇÕES

Para estudos futuros e para a implementação concisa do projecto recomenda-se:

- O uso de dados mais atualizados do que os dados do Plano Director de GRS da Cidade de Maputo. Para o cálculo da capitação de resíduos para a reciclagem de resíduos de alumínio;
- O estudo de avaliação de risco detalhada para um reactor de produção de gás hidrogénio para evitar uma atmosfera inflamável;
- Aplicação do método de análise de SWOT para um bom Sistema de Gestão Ambiental na produção de gás hidrogénio;
- O dimensionamento de um reactor batch para operações exotérmicas e capazes de fornecer o tempo de residência necessária para que os reagentes completem a reacção química, e permitir a troca de calor necessária;
- A análise detalhada da condutividade no instante em que ocorre a reacção de oxidação para a elaboração de cálculos de energia de ativação;
- A realização de um estudo aprofundado de transferência de calor nas paredes do reactor;
- A realização de testes para aferir a pureza do gás hidrogénio produzido;
- A execução de experiências eletroquímicas para calcular a energia produzida pela célula de combustível;
- Determinação do custo de investimento do projecto de reciclagem de resíduos de alumínio, e de dimensionamento de uma célula de combustível para medir a avaliação de viabilidade económica do projecto.

## BIBLIOGRAFIA

Alves, H. j. (18/05/2017). *Bioenergia*. UFPR.

Ambiental . (2012). *Estrategia de Gestao Integrada de Residuos Solidos Urbano em Mocabique* .

Ayello, B. (2021). *AmbienteBrasil* . Obtido em 10 de 08 de 2021, de Tempo de Decomposicao dos Materiais-AmbienteBrasil:  
[www.ambientes.ambientebrasil./residuos./reciclagem/tempo.com](http://www.ambientes.ambientebrasil./residuos./reciclagem/tempo.com)

Barros, C. F. (2005). In C. F. Barros, *QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS NO ESTADO DE MINAS GERAIS EM 2004*. MINAS GERAIS .

Bezerra, J. (2009). *Processamento do Gás Natural-EST*. In E. S. Tecnologia-EST, *Processamento do Gas Natural* (p. 24).

Bittencourt, C. (2013). *Simulação e Operação de Célula de Combustível de Hidrogénio Através da Corrosão Alcalina do Alumínio*. Porto Alegre: Porto.

Cabral, F. (2012). *Manual de Segurança, Higiene e Saúde do Trabalho*. Verlag Dashover.

Carneiro, F. (2020). *MODELAGEM DE UM REACTOR DE GERAÇÃO DE HIDROGÉNIO A PARTIR DE ALUMÍNIO*. Curitiba: Curitiba.

Carneiro, F. (2020). *MODELAGEM DE UM REACTOR DE GERAÇÃO DE HIDROGÉNIO A PARTIR DE ALUMÍNIO*. Curitiba.

Celpur-Tecnica Ambiental. (s.d.). *Celpur-Tecnica Ambiental Lda, Limpeza Urbana*. Obtido em 12 de 2021, de Celpur-Tecnica Ambiental Lda, Limpeza Urbana:  
<https://celpur.pai.pt/limpeza-urbana>

Celpur-Tecnica Ambiental Lda. (s.d.). *Celpur-Tecnica Ambiental Lda, Limpeza Urbana*. Obtido em 12 de 2021, de Celpur-Tecnica Ambiental Lda, Limpeza Urbana:  
<https://celpur.pai.pt/limpeza-urbana>

CMCM. (2007). *Plano Director de Gestao de Residuos da Cidade de Maputo*. Maputo.

Colli, A. (2012). *Colecao UAB-UFSCar Engenharia Ambiental-Reactores Quimicos e Bioquimicos*. Sao Carlos, SP Brasil: Moreira Cares.

Conselho de Ministros . (31 de Dezembro 2014). *DECRETO NÚMERO 94/2014 (REGULAMENTO SOBRE GESTÃO DE RESIDUOS SÓLIDOS HURBANOS)*. *DECRETO NÚMERO 94/2014*. MAPUTO.

CORESAB. (26 de 01 de 2021). *Novo Marco do Saneamento Oportunidade de Recuperacao Energetica de Residuos*. Obtido em 01 de 2022, de CORESAB:

[www.coresab.com.br/2021/novo-marco-do-saneamento-oportunidade-de-recuperacao-energetica.com.br](http://www.coresab.com.br/2021/novo-marco-do-saneamento-oportunidade-de-recuperacao-energetica.com.br)

Deng, e. a. (2007). *Etapas da Formacao do Hidrogenio Sobre o Filme Hidratado de Oxido de Aluminio* .

ENEM. (s.d.). *Cienciaemacao.br/taxas-de –reação-e-leis-de-velocidade* . Obtido em 12 de 2021, de [www.Cienciaemacao.br/taxas-de –reação-e-leis-de-velocidade.com](http://www.Cienciaemacao.br/taxas-de –reação-e-leis-de-velocidade.com)

Felder, R. R. (2000). *Principios elementares dos processos quimicos,LTC*. In R. M. Felder, *Principios elementares dos processos quimicos* (p. 712). New York: 3a. Edicao John Willey & Son.

Fernando, A. (2013). *Diagnostico Sobre Gerenciamento de Residuos Solidos Urbanos* . UBERLANDIA/MG: Instituto de Geografia-IG.

FOGLER. (2009). *Elements of Chemical Reaction Engineering*. Michigan: 4edicao.

FOGLER. (2009). *Elements of Chemical Reaction Engineering*. Michigan: 4edicao .

Fonseca, L. E. (2009). *Reciclagem O Primeiro Passo para Preservação Ambiental* . Centro Universitario de Barra Massa .

FOUAD. (2014). *Aundancia de Hidrogenio na natureza* .

Galante, E. B. (2015). *Princípios de Gestão de Riscos*. Curitiba: Appris.

Graja, V. (2011). *Proposta de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos com Enfoque em Educação Ambiental para o Município de Tio Hugo-RS*. Brasil.

INE. (2007). *Distribuição Percentual da População Por Sexo, Segundo Distrito Municipais*. MAPUTO CIDDE.

INE. (2007). *Distribuição Percentual da População Por Sexo, Segundo Distrito Municipais*. MAPUTO.

Jaime D Holladay, J. H. (2009). *An Overview of Hydrogen Production Technologies. Catalysis Today*. Richland, WA 99352,USA: Elsevier B.V.

John Petrovic, G. T. (2008). *Reaction of Aluminium with Water to Produce Hydrogen* . United States of America (USA): Los Alamos National Laborator (retired).

Lages, A. (23 de 01 de 2018). *Guia da Engenharia*. Obtido em 04 de 2022, de Guia da Engenharia: [www.guiadaengenharia/parametros-qualidade-de-aluminio-agua.com](http://www.guiadaengenharia/parametros-qualidade-de-aluminio-agua.com)

Levy, C. (2006). *Resíduos Sólidos Urbanos: Princípios e Processos*. Lisboa.

- Medeiros. (2002). Instrucoes para elaboracao do Plano de Gestao de Residuos .
- MeuResiduo Solucoes Tecnologicas,LTDA. (Abril de 2021). *MeuResiduo*. Obtido em 03 de 2022, de MeuResiduo: [www.meuresiduo/categoria-1-de-residuos-sólidos.com](http://www.meuresiduo/categoria-1-de-residuos-sólidos.com)
- MICOA. (2005-2015). Plano Estratégico do Sector do Ambiente. *Plano Estratégico do Sector do Ambiente*, (p. 14). Maputo.
- Miezah, K. (2015). Waste Management. In K. Miezah, *Municipal Solid Waste Characterization and Quantification* (p. 27). Ghana.
- Ministério Para Coordenação da Acção Ambiental (MICOA). (2009). *Manual do Educador Ambiental*. Maputo: Maquetizacao & Impressao-1o Edicao Maputo-Tiragem 3000.
- Nassel. Manual de Gestao de Residuos solidos . Maputo .
- Nassel, P. C. (2014). Manual de Gestao de Residuos Solidos. Maputo.
- OCDE. (1997 ). Waste collection . *Glossary Of Environmental Estatistical Terms* (p. 7). USA New York: Serial F, No.67.
- Ologunde, A. (2019). Metais Reagem Com Base.
- Porcincula, C. (2013). *Simulação e operação da célula de combustível com geração in situ de hidrogénio através da corrosão alcalina de alumínio*. Porto Alegre.
- PortalEnergia. (2019). Nas células de combustível alcalinas. *Portal-Energia* .
- Próambientaltecnologia. (2006). A IMPORTANCIA ADEQUADA DA SEGREGACAO DOS RESÍDUOS. *SOLUÇÕES EM RESÍDUOS* .
- Reluca Felseghi, E. C. (2019). *Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Aplication*. Street, No.13,720229 Suceava, Romania: Cryogenic and Isotopic Technologies.
- Ross, K. &. (2007). *Classificação de células de combustível*.
- Roxo, M. M. (2006). *Segurança e Saúde do Trabalho: Avaliação e Controlo de Riscos*. Coimbra: Almedina.
- TWI. (s.d.). *Technical knowledge Pros and cons of hydrogen fuel cells*. Obtido em 10 de 1 de 22, de twi: [www.twi-global/trchnical-knowlege/faqs/-pros-and-cons-of-hydrogen-fuel-cells.com](http://www.twi-global/trchnical-knowlege/faqs/-pros-and-cons-of-hydrogen-fuel-cells.com)
- Universidade do Minho . (2017). *Hierarquia de Gestao de Residuos* . Minho: Braval-Pt.

Valorsul. (2021). *Valorsul*. Obtido em 19 de 04 de 2022, de Ecocentro/Triagem de materiais recicláveis : [www.valorsul.pt/pt/seccao/areas-de-Triagem-de-materiais-reciclaveis/ecocentros](http://www.valorsul.pt/pt/seccao/areas-de-Triagem-de-materiais-reciclaveis/ecocentros)

Vedantu. (24 de 11 de 2020). reaccao de metais com base.

(2019). Waste hierarchy.

WastePortal. (2021). Aluminium-Waste. *Wasteportal* .

Waste-To-Energy Research and Technology Council . (2009). Waste Hierarchy.

World Fuel Cell Council.

Y.Bultel. (2007). *Process Safety and Environmental Protection* . Franca.

## **ANEXO(A)**

**ANEXO A1: RESULTADOS DO CÁLCULO DA PROJEÇÃO DE RESÍDUOS  
PRODUZIDOS NA ÁREA DA TERMINAL RODOVIÁRIA INTERPROVINCIAL E  
INTERNACIONAL DA JUNTA**

**A1.1. Distribuição Percentual da População Segundo Distritos Municipais Maputo  
Cidade**

<b>Distritos Municipais</b>	<b>Total</b>
N	1,111,638
Total	100.0
Kampfumu (DM 1)	9.9
<b>Nhlamankulu (DM 2)</b>	<b>14.1</b>
Kamaxakeni (DM 3)	20.4
Kamavota (DM 4)	26.8
Kamubukwana (DM5)	26.5
Katembe (DM 6)	1.8
Kanyaca (DM 7)	0.5

(INE, 2007)

**A1.2. Tabela de Produção de Resíduos na Cidade de Maputo ano 2007**

Na projeção, os valores correspondentes a produção por habitante e densidade foram retirados da tabela abaixo.

N.º	Área	Habitantes (Censo 2007)	Produção média RSD (kg/cap e dia)	Densidade de RSD (ton/m <sup>3</sup> )
1a	"Cidade de Cimento", alta densidade	111.789	1,00	0,25
1b	"Cidade de Cimento", vivendas	37.664	1,60	0,22
1	"Cidade de Cimento", total	149.453	1,15	-
2	Área suburbana	776.070	0,49	0,49
3	Zonas rurais	147.656	0,25	0,35
4	Catembe	20.629	0,20	0,35
5	Inhaca	5.211	0,20	0,35
	<b>Total</b>	<b>1.099.019</b>	<b>0,54</b>	

Fonte: Plano Director de Gestão de RSU na Cidade de Maputo

(CMCM, 2007)

**A1.3. A Projeção da População e da Produção de Resíduos no Distrito Municipal de Nhlamankulu (DM2). A zona onde esta alocada a Terminal Rodoviário Interprovincial e Internacional da Junta.**

	Habitantes	Producao media(Kg/(cap e dia)	Densidade (ton/m3)	Quantidade (ton/dia)	Volume(m3/dia)
<b>Area Suburbana</b>	776070	0.49	0.49	380274	776.07
<b>INE</b>	<b>População total na cidade de Maputo ano 2007 (hab)</b> 1111638				
População total na zona do distrito municipal de Nhlamankulu ano 2007(hab)					<b>156741</b>

Ano	Projeção da população		Produção média (kg/cap e dia)	Densidade ton/m3	Quantidade ton/dia	Volume m3/dia
	Zona suburbana	Nhlamankulo (DM2)				
2007	776070	156741	0.49	0.49	76.80	156.74
2008	789263	159406	0.49	0.49	78.11	159.41
2009	802681	162115	0.49	0.49	79.44	162.12
2010	816326	164871	0.49	0.49	80.79	164.87
2011	830204	167674	0.49	0.49	82.16	167.67
2012	844317	170525	0.49	0.49	83.56	170.53
2013	858671	173424	0.49	0.49	84.98	173.42
2014	873268	176372	0.49	0.49	86.42	176.37
2015	888114	179370	0.49	0.49	87.89	179.37
2016	903212	182419	0.49	0.49	89.39	182.42
2017	918566	185521	0.49	0.49	90.91	185.52
2018	934182	188674	0.49	0.49	92.45	188.67
2019	950063	191882	0.49	0.49	94.02	191.88
2020	966214	195144	0.49	0.49	95.62	195.14
2021	982640	198461	0.49	0.49	97.25	198.46
2022	999344	201835	0.49	0.49	98.90	201.83
2023	1016333	205266	0.49	0.49	100.58	205.27
2024	1033611	208756	0.49	0.49	102.29	208.76
2025	1051182	212305	0.49	0.49	104.03	212.31
2026	1069052	215914	0.49	0.49	105.80	215.91
2027	1087226	219584	0.49	0.49	107.60	219.58
2028	1105709	223317	0.49	0.49	109.43	223.32

2029	1124506	227114	0.49	0.49	111.29	227.11
2030	1143623	230975	0.49	0.49	113.18	230.98
2031	1163064	234901	0.49	0.49	115.10	234.90
2032	1182837	238895	0.49	0.49	117.06	238.89
2033	1202945	242956	0.49	0.49	119.05	242.96
2034	1223395	247086	0.49	0.49	121.07	247.09
<b>2035</b>	<b>1244192</b>	<b>251287</b>	<b>0.49</b>	<b>0.49</b>	<b>123.13</b>	<b>251.29</b>

#### A1.4 Dados Plano Director de GRS da Cidade de Maputo, dados do ano 2007

Fonte: (CMCM, 2007)

Composição dos RSU (%)	"Cidade de Cimento"	Zonas suburbanas	
		com fracção fina	sem fracção fina
Papel/papelão/papel higiénico	12,4	2,1	5,0
Trapos/couros/borracha	2,3	1,6	3,7
Metais ferrosos/não ferrosos	1,8	0,7	1,7
Vidro	3,3	1,1	2,6
Plástico mole/duro	9,9	3,7	8,7
Matéria orgânica fina/grossa	68,4	29,4	69,0
Outros (perigosos, entulho)	1,9	3,9	9,2
Fracção fina (<10mm)		57,5	

	ton/dia
Comércio o Serviços	198,00
Indústria	60,00
Verdes e Jardins	30,00
Mercados e Feiras	90,00
Volumosos	10,00
Entulhos	50,00
Varredura	22,00
Hospitalares	761,00
Perigosos	6,00
<b>Total</b>	<b>1 227,00</b>
<b>Total (excl hospitalares e perigosos)</b>	<b>460,00</b>

Fonte: Plano Director de Gestão de RSU na Cidade de Maputo, dados de 2007



Fonte: (CMCM, 2007)

**A1.5. Quantidade de RS na área suburbana (comercio e serviço, mercados e feiras, varredura) para ano 2035**

	ton/dia(2007)	ton/dia (ano 2035)
<b>Comércio e serviço</b>	198	317.43
<b>Mercados e feiras</b>	90	144.29
<b>Varreduras</b>	22	35.27
<b>Total de RSU Comercio e serviço, mercados e feiras, varreduras(2035)</b>	310	497

**A1.6. Capitação de Papel e Metal na Área de Nhamankulo para Projeção do ano 2035**

<b>Nhamankulo (DM2) ton/dia</b>	
Papel	2.59
Metal	0.862

$$Q_{Papel} = 0.021 * 123.130 \left( \frac{ton}{dia} \right) = 2.59ton/dia$$

$$Q_{Metal} = 0.007 * 123.130 \left( \frac{ton}{dia} \right) = 0.862ton/dia$$

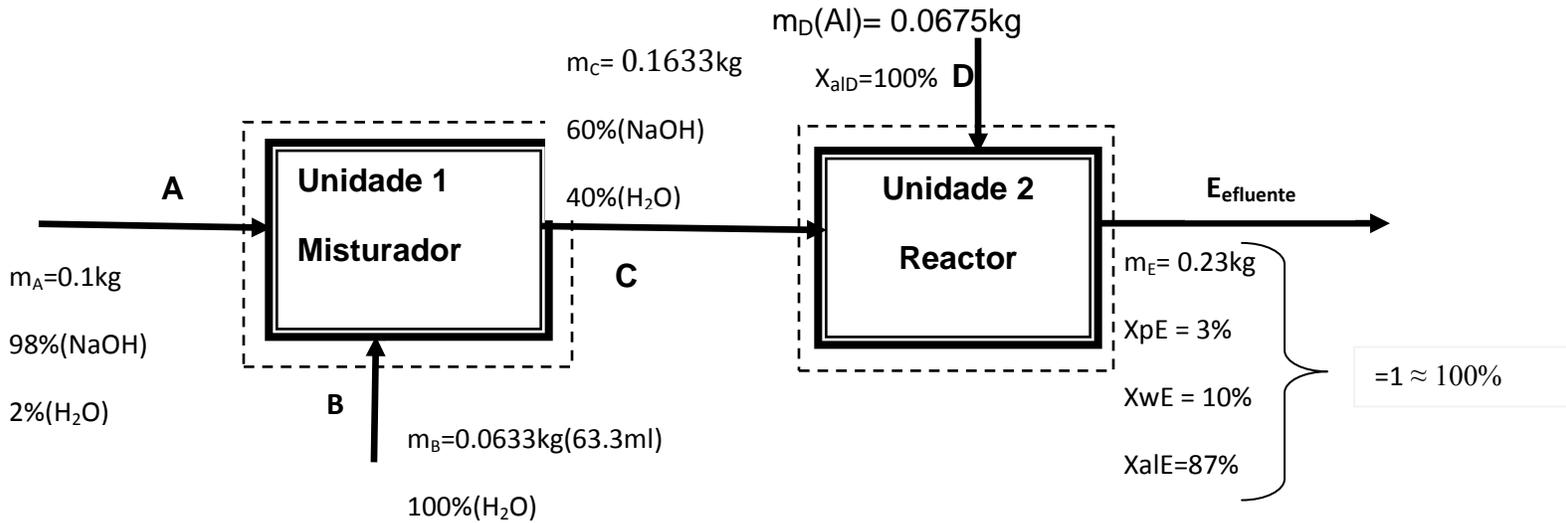
**ANEXO 2: BALANÇO MÁSSICO PARA A COMPOSIÇÃO DA ALIMENTAÇÃO E EFLUENTE NO REACTOR**

A2.1. Balanco Mássico da Reação com Hidróxido de Sódio para a Reciclagem de Resíduos de Alumínio.

	PM(g/mol)
PM(NaOH)	40
PM(AL)	27
PM(H2O)	18
PM(Na2AL2O4)	164
PM(H2)	2

Este consistiu na alimentação das seguintes quantidades:  $100g(NaOH) + 63.3mlH_2O + 67.5g(\text{residuo de aluminio})$  de acordo com o balanco mássico.

## Diagrama do 1º Experimento e Balanço Mássico Anexo A2.1



## Diagrama de balanço mássico para a composição no reactor- 1º Experimento

Fonte: Autor

### Legenda para Unidade 1 & 2

Componente U1	
H	Hidróxido de Sódio
W	Água

<b>A</b>	Alimentação de soda cáustica com humidade
<b>B</b>	Alimentação de água destilada
<b>C</b>	Efluente do misturador (Solução diluída de soda caustica)

### Componente U2

H	Solução aquosa de hidróxido de sódio alimentação
Al	Alimentação de residuo de aluminio
P	Efluente hidrogénio produto
S	Subproduto aluminato de sódio aquoso

### Corrente U2

C	Alimentação da solução diluída de hidróxido
D	Alimentação de residuo
E	Efluente do reactor produto
F	Efluente do reactor subproduto (Sal)

**Balanco global na Unidade 1 (U1):**  $m_A + m_B = m_C \leftrightarrow 0.1\text{kg} + 0.0633 = 0.1633\text{kg}$

$$A \begin{cases} m_A = 0.1\text{kg} \\ X_{hA} = 98\% \\ X_{wA} = 2\% \end{cases}$$

$$B \begin{cases} m_B = ? \quad V_B = ? \\ X_{hB} = 0,0\% \\ X_{wB} = 100\% \end{cases}$$

$$C \begin{cases} m_C = ? \\ X_{hC} = 60\% \\ X_{wC} = 40\% \end{cases}$$

**Composição unidade-1(U1)**

**Componente (h)**

$$m_A X_{hA} + m_B X_{hB} = m_C X_{hC}$$

$$m_B X_{hB} = 0 ; \text{ Logo}$$

Água destilada não tem hidróxido.

$$m_A X_{hA} + 0 = m_C X_{hC}$$

$$0.1\text{kg} * 0.98 = m_C * 0.6$$

$$m_C = \frac{0.1\text{kg} * 0.98}{0.6}$$

$$m_C = 0.1633\text{kg}$$

**Componente (w)**

$$m_A X_{wA} + m_B X_{wB} = m_C X_{wC}$$

$$0.1\text{kg} * 0.02 + m_B * 1 = 0.1633\text{kg} * 0.4$$

$$m_B = \frac{(0.1633\text{kg} * 0.4) - (0.1\text{kg} * 0.02)}{1}$$

$$m_B = 0.0633\text{kg} \quad V_B \text{ (L)} = ?$$

$$\rho_w = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1\text{m}^3}{10^3\text{l}} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}$$

$$V_w = \frac{m_w}{\rho_w} = \frac{0.0633\text{kg}}{1 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 0.0633\text{l de água(w)}$$

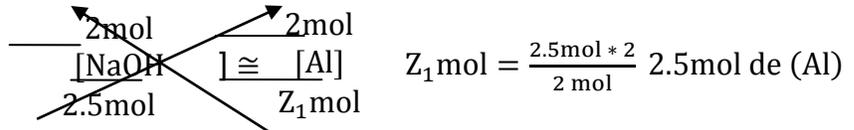
$$V_w = 63.3\text{ml}$$

**Balanco global na Unidade 2 (U2)**

$$m_C + m_D = m_E + m_F \leftrightarrow 0.1633 + 0.0675 = m_{\text{Eflu}}$$

### Balço por componente unidade-2(U<sub>2</sub>)

{	<b>C</b>	$m_C = 0.1633\text{Kg}$	{	<b>D</b>	$m_D = ? \quad V_B = ?$	{	<b>E<sub>fluente</sub></b>	$m_{\text{Efluente}} = ?$
		$X_{hC} = 60\%$			$X_{hD} = 0,0\%$			$X_{pE} = ?$
		$X_{wC} = 40\%$			$X_{alD} = 100\%$			$X_{wE} = ?$
			$X_{wD} = 0,0\%$		$X_{alE} = ?$			
					$X_{hE} = ?$			



$$n(\text{NaOH})_{\text{com humidade}} = \frac{100\text{g}}{40\text{g/mol}} = 2.5\text{mol} \quad m_D = 2.5\text{mol} * \frac{27\text{g}}{\text{mol}} = 67.5\text{g} = 0.0675\text{kg(Al)}$$

$$n(\text{NaOH})_{\text{seco}} = \frac{0.1633\text{kg} * 0.6}{40\text{g/mol}} = \frac{97.98\text{g}}{40\text{g/mol}} = 2.45\text{m}$$

### Balço por componente (Hidróxido)

$$E_{entra} - S_{ai} - C_{onsumo} = 0 \rightarrow 0.09798\text{kg} - S - 0.09798\text{kg} = 0 \text{ Conversão de } 100\%$$

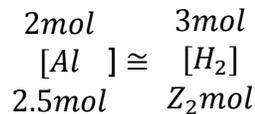
$$S=0$$

### Balço por componente (Alumínio)

$$E_{entra} - S_{ai} - C_{onsumo} = 0 \rightarrow 0.0675\text{kg} - S - 0.0675\text{kg} = 0 \text{ Conversão de } 100\%$$

$$S=0$$

### Balço por componente (w) água



0 -> O alumínio não tem água

$$m_C X_{wC} + m_D X_{wD} = m_E X_{wE}$$

$$Z_2\text{mol} = \frac{2.5\text{mol} * 3\text{mol}}{2\text{mol}} = 3.75\text{mol}$$

$$m_C X_{wC} = m_{\text{Eflu}} X_{w\text{Eflu}}$$

$$m_E(\text{H}_2) = n * PM = 3.75\text{mol} * \frac{2\text{g}}{\text{mol}} = 7.5\text{g} = 0.0075\text{kg}(\text{H}_2)$$

$$E - S - C = 0$$

$$PV = nRT \quad V = \frac{nRT}{P} = \frac{3.75\text{mol} * 0.082 \left(\frac{\text{l atm}}{\text{mol K}}\right) * 298\text{K}}{1\text{ atm}} = 91.64\text{l}$$

$$E_{entra} - S_{ai} - C_{onsumo} = 0$$

$$m_C + m_D = m_{\text{Efluente}} \leftrightarrow 0.1633 + 0.0675 = m_{\text{Efluente}}$$

### Cálculo da água consumida e água que sai no reactor sem reagir

$$\text{Água consumida: } \begin{matrix} 2\text{mol} & 2\text{mol} \\ [\text{NaOH}] \cong & [\text{H}_2\text{O}] \rightarrow Z_3\text{mol} = 2.45\text{mol}(\text{agua}) \rightarrow m(\text{H}_2\text{O}) = 2.45\text{mol} * \\ 2.45\text{mol} & Z_3\text{mol} \end{matrix}$$

$$18\text{g/mol} \rightarrow 44.1\text{g} = 0.0441\text{kg} \quad \text{água que Sai: } 0.1633 * 0.4 - S - 0.0441 = 0 \rightarrow S =$$

$$0.0212\text{kg} \rightarrow X_{\text{wEflu}} = \frac{0.1633*0.4 - 0.0441}{0.23} \cong 0.1 = 10\%$$

$$\text{Balanço por componente produto hidrogénio (pE): } E - S + G - C = 0 \rightarrow S = G$$

$$\cancel{m_C X_{pC}} + \cancel{m_D X_{pD}} + m_P = m_{\text{Eflu}} X_{pE} \rightarrow \text{Saida é igual a Geracao} \rightarrow S = G$$

$$X_{pEflu} = \frac{0.0075}{0.23} \cong 0.03 = 3\%$$

### Balanço por componente subproduto

#### Fração mássica do subproduto sal na corrente do E<sub>efluente</sub>

$$\begin{matrix} 2\text{mol} & 1\text{mol} \\ [\text{NaOH}] \cong & [\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4] \rightarrow Z_4\text{mol} = 1.225\text{mol} \rightarrow m = 1.225\text{mol} * \frac{164\text{g}}{\text{mol}} = 200.9\text{g} = \\ 2.45\text{mol} & Z_4\text{mol} \end{matrix}$$

0.201kg

$$X_{\text{SalEflu}} = \frac{0.201}{0.23} \cong 0.87 = 87\%$$

$$X_{\text{wEflu}} + X_{\text{SalEflu}} + X_{\text{Produto}(\text{H}_2)\text{Eflu}} = 0.1 + 0.87 + 0.3 = 1 = 100\%$$

$$gc = \frac{n(\text{reagio})}{n(\text{alimentacao})} = \frac{n'_A}{n_A} \times 100\% \leftrightarrow gc = \frac{2.5\text{mol}}{2.5\text{mol}} \times 100\% = 100\%$$

### Cálculo de excesso do reagente (Excesso da água)

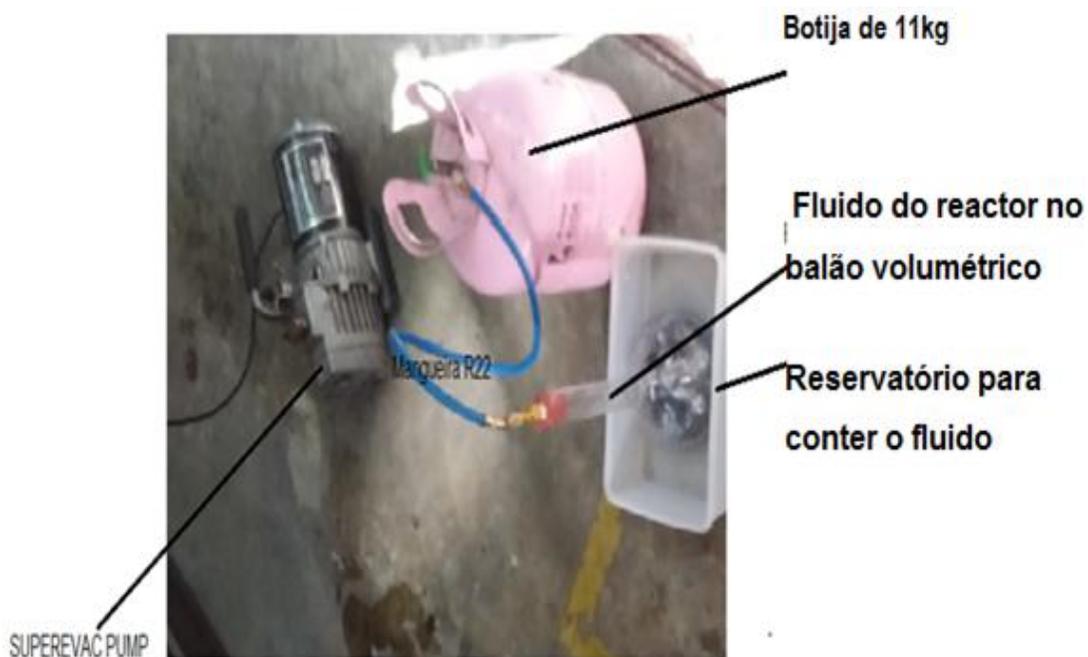
$$R_{BEx} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}} - n'_{\text{H}_2\text{O}}}{n'_{\text{H}_2\text{O}}} \times 100\%$$

$$\%R_{Ex(\text{H}_2\text{O})} = \frac{3.63 - 2.5}{2.5} \times 100\% \cong 45\%$$

**Tabela de Resultados do Balanço Mássico-1º Experimento (Anexo A2.2)**

	A	XA	B	XB	C	XC	D	XD	E <sub>Efluente</sub>	X <sub>Efluente</sub>
<b>NaOH</b>	0.1kg	0.98	-	-	0.163kg	0.6	-		-	
<b>H<sub>2</sub>O</b>	-	0.02	63.3ml	1.0		0.4	-		0.0212kg	0.1
<b>Al</b>	-	-	-	-	-	-	0.0675kg	1.0	-	-
<b>Na<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-		0.201kg	0.87
<b>H<sub>2</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-		0.0075kg	0.03
<b>Total</b>	0.1kg	1	63.3ml	1	0.163kg	1	0.0675kg	1	0.2297 $\cong$ 0.23kg	1 = 100%

No **1º experimento** alimentou-se o gás produzido para uma botija, através de uma bomba SUPEREVAC PUMP (Anexo A2.3)



Fonte: (Autor, 2021)

Leitura da pressão no interior da botija, pressão de saída do gás e a temperatura. (Anexo A2.4)



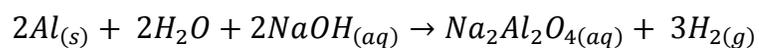
Anexo 3:

### A3.1 Balanço mássico do 2º Experimento

Razão Teórica e prática para a redução da quantidade de resíduo de alumínio

**Razão teórica e razão prática dos reagentes**

**Razão pratica e a razão teórica em relação a água que alimenta o reactor:**



$$PM(H_2O) = 18g/mol$$

$$PM(NaOH) = 40g/mol$$

$$PM(Al) = 27g/mol$$

$n = m/PM$   $PM \rightarrow$  **peso de uma molécula de substancia**

$$n(NaOH) = \frac{(0.1633 * 0.6 * 1000)g}{40g/mol} = \frac{97.98g}{40g/mol} = 2.45mol \quad n(Al) = \frac{(67.5/10)g}{27g/mol} = 0.25mol$$

$$n(H_2O) = \frac{(0.1633 * 0.4 * 1000)g}{18g/mol} = \frac{65.3g}{18g/mol} = 3.63 \cong 3.6mol$$

$$R_T \frac{(H_2O)}{(NaOH)} = \frac{2}{2} = 1$$

$$R_P \frac{(H_2O)}{(NaOH)} = \frac{3.63mol}{2.45mol} = 1.48$$

$$R_T \frac{(H_2O)}{(Al)} = \frac{2}{2} = 1$$

$$R_P \frac{(H_2O)}{(Al)} = \frac{3.63mol}{0.25mol} = 14.52$$

$R_P > R_T$  logo: A água ( $H_2O$ ) é o reagente em excesso.

**Razão pratica e a razão teórica em relação ao hidróxido de sódio:**

$$R_T \frac{(NaOH)}{(Al)} = \frac{2}{2} = 1$$

$$R_P \left( \frac{NaOH}{Al} \right) = \frac{2.45mol}{0.25mol} = 9.8$$

$$R_T \frac{(NaOH)}{(H_2O)} = \frac{2}{2} = 1$$

$$R_P \frac{(NaOH)}{(H_2O)} = \frac{2.45mol}{3.63mol} = 0.7$$

$R_P < R_T$

➡ O alumínio é reagentes limitante

### Cálculo de excesso do reagente

$$R_{BEEx(HOH)} = \frac{n_{H_2O} - n'_{H_2O}}{n'_{H_2O}} \times 100\% = \frac{3.63 - 2.45}{2.45} = 48\%$$

Cálculo do número de moles do reagente em excesso necessário para reagir completamente com o reagente limitante:

$$\begin{matrix} 2\text{mol} & 2\text{mol} \\ [Al] \cong [H_2O] & Z_2\text{mol} = \frac{0.25\text{mol} * 2}{2\text{mol}} = 0.25\text{mol} \\ 0.25\text{mol} & Z_1\text{mol} \end{matrix}$$

### Cálculo do grau de conversão (gc) para resíduo de alumínio

$$gc(Al) = \frac{n(\text{reagio})}{n(\text{alimentacao})} = \frac{n'_A}{n_A} \times 100\% \leftrightarrow gc = \frac{0.25\text{mol}}{0.25\text{mol}} \times 100\% = 100\%$$

PM(g/mol)		Tabela de resultados para unidade 1(Misturador )						
PM(NaOH)	40	CondiçõesdeAlimentação,					Efluente (C) kg	
		(A)kg		(B)kg		V(B)L	mC	
PM(AL)	27	mA =	0.10	mB =	0.0633	0.0633	=	0.1633
PM(H2O)	18	XwA =	2%	XwB =	100%		XwC =	40%
PM(Na2AL2O4)	164	XhA =	98%	XhB =	0%		XhC =	60%
PM(H2)	2	(%A)Total =	100%	(%B)Total =	100%		(%C)Total =	1.0
densidade(w)	1	Kg/l		numero de mol(AL)= 0.25 0.082 (l*atm)/(mol*K)				
Pressao	1	Atm						
T	298	K						
numro de mol de (NaOH)= R (constante Universal dos gases)=		2.5						

**Balanco global na Unidade 1 (U1):  $m_A + m_B = m_C$**

$$A \begin{cases} m_A = 0.1 \\ X_{hA} = 98\% \\ X_{wA} = 2\% \end{cases}$$

$$B \begin{cases} m_B = ? \quad V_B = ? \\ X_{hB} = 0,0\% \\ X_{wB} = 100\% \end{cases}$$

$$C \begin{cases} m_C = ? \\ X_{hC} = 60\% \\ X_{wC} = 40\% \end{cases}$$

**Composição unidade-1(U1)**

**Componente (h)**

$$m_A X_{hA} + m_B X_{hB} = m_C X_{hC}$$

$$m_B X_{hB} = 0 ; \text{ Logo}$$

Água destilada não tem hidróxido.

$$m_A X_{hA} + 0 = m_C X_{hC}$$

$$0.1\text{kg} * 0.98 = m_C * 0.6$$

$$m_C = \frac{0.1\text{kg} * 0.98}{0.6}$$

$$m_C = 0.1633\text{kg}$$

**Componente (w)**

$$m_A X_{wA} + m_B X_{wB} = m_C X_{wC}$$

$$0.1\text{kg} * 0.02 + m_B * 1 = 0.1633\text{kg} * 0.4$$

$$m_B = \frac{(0.1633\text{kg} * 0.4) - (0.1\text{kg} * 0.02)}{1}$$

$$m_B = 0.0633\text{kg} \quad V_B \text{ (L)} = ?$$

$$\rho_w = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1\text{m}^3}{10^3\text{l}} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}$$

$$V_w = \frac{m_w}{\rho_w} = \frac{0.0633\text{kg}}{1 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 0.0633\text{l de água(w)}$$

$$V_w = 63.3\text{ml}$$

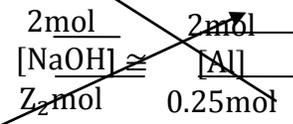
## Balanco global na Unidade 2 (U2)

$$m_C + m_D = m_E \leftrightarrow 0.1633 + 0.0675/10 = m_{E\text{efluente}}$$

## Componente do P (produto)-Hidrogenio

### Balanco por componente unidade-2(U2)

{	$m_C = 0.1633\text{Kg}$	{	$m_D = ? \quad V_B = ?$	{	$m_{E\text{efluente}} = ?$
	$X_{hC} = 60\%$		$X_{hD} = 0,0\%$		$X_{pE\text{eflu}} = ?$
	$X_{wC} = 40\%$		$X_{alD} = 100\%$		$X_{wE\text{eflu}} = ?$



$$Z\text{mol} = \frac{0.25\text{mol} * 2}{2\text{mol}} = 0.25\text{mol de (NaOH)}$$

$$m_D = m(\text{Al}) = 0.25\text{mol} * \frac{27\text{g}}{\text{mol}} = 6.75\text{g} = 0.00675\text{kg} \quad m_D = 6.75\text{g} = 0.00675\text{kg(Al)}$$

$$m(\text{hidróxido consumido}) = 0.25\text{mol} * \frac{40\text{g}}{\text{mol}} = 10\text{g} = 0.01\text{kg}$$

### Balanco por componente Hidróxido(h) no Produto

$$Eentra - Sai - Consumo = 0 \rightarrow 0.09798\text{kg} - S - 0.01\text{kg} = 0$$

$$S = 0.08798\text{kg}$$

$$X_{hSai} = \frac{mh}{m_{E\text{efluente}}} = \frac{0.08798\text{kg}}{0.17\text{kg}} \cong 0.52 = 52\%$$

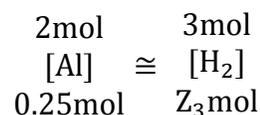
### Balanco por componente (Alumínio)

$$Eentra - Sai - Consumo = 0 \rightarrow 0.00675\text{kg} - S - 0.00675\text{kg} = 0 \text{ Conversão de } 100\%$$

$$S = 0$$

### Balanco por componente (w) água

$$m_C X_{wC} + m_D X_{wD} = m_{E\text{efluente}} X_{wE\text{eflu}}$$



$$Z_3\text{mol} = \frac{0.25\text{mol} * 3\text{mol}}{2\text{mol}} = 0.375\text{mol}$$

$$m_{pEflu}(H_2) = n * PM = 0.375 \text{ mol} * \frac{2g}{\text{mol}} = 0.75g = 0.00075kg(H_2)$$

Entrada – Saída – Consumo=0

$$PV = nRT \quad V = \frac{nRT}{P} = \frac{0.375 \text{ mol} * 0.082 \left(\frac{1 \text{ atm}}{\text{mol K}}\right) * 298.15K}{1 \text{ atm}} = 9.2L$$

$$m_C + m_D = m_{Efluente} \leftrightarrow 0.1633 + 0.00675 = m_{Efluente}$$

### Cálculo da água consumida e água que sai no reactor sem reagir

$$\text{Água consumida: } \begin{matrix} 2 \text{ mol} & 2 \text{ mol} \\ [Al] & \cong & [H_2O] \\ 0.25 \text{ mol} & & Z_4 \text{ mol} \end{matrix} \rightarrow Z_3 \text{ mol} = 0.25 \text{ mol}(\text{água}) \rightarrow m(H_2O) = 0.25 \text{ mol} * 18g/\text{mol} \rightarrow 4.5g = 0.0045kg$$

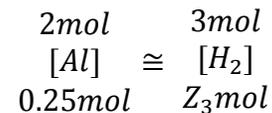
$$\text{água que Sai (S): } 0.1633 * 0.4 - S - 0.0045 = 0 \rightarrow S =$$

$$0.0608kg \rightarrow X_{wEflu} = \frac{0.1633 * 0.4 - 0.0045}{0.17} \cong 0.36 = 36\%$$

### **Balço por componente produto hidrogénio (pE): $E - S + G - C = 0 \rightarrow S = G$**

$$m_C X_{pC} + m_D X_{pD} + m_p = m_{Eflu} X_{pEflu} \rightarrow \text{Saída é igual a Geracao} \rightarrow S = G = 0.00075kg$$

$$X_{pEflu} = \frac{0.00075kg}{0.17kg} \cong 0.0044 = 0.44\%$$



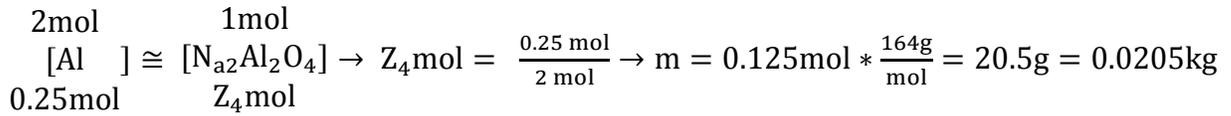
$$Z_3 \text{ mol} = \frac{0.25 \text{ mol} * 3 \text{ mol}}{2 \text{ mol}} = 0.375 \text{ mol}$$

$$m_{pEflu}(H_2) = n * PM = 0.375 \text{ mol} * \frac{2g}{\text{mol}} = 0.75g = 0.00075kg(H_2)$$

$$PV = nRT \quad V = \frac{nRT}{P} = \frac{0.375 \text{ mol} * 0.082 \left(\frac{1 \text{ atm}}{\text{mol K}}\right) * 298.15K}{1 \text{ atm}} = 9.2$$

## Balço por componente subproduto

### Fraço mássica do subproduto sal na corrente do E<sub>efluente</sub>



$$X_{\text{SalEflu}} = \frac{0.0205}{0.17} \cong 0.12 = 12\%$$

$$m_{\text{Efluente}} = m_w + m_{\text{sal}} + m_{\text{hidrox}} + m_{\text{pE}} = 0.06082 + 0.0205 + 0.08798 + 0.00075\text{kg} \\ = 0.1701\text{kg}$$

$$X_{w\text{Eflu}} + X_{\text{SalEflu}} + X_{h\text{Eflu}} + X_{\text{Prod}(\text{H}_2)\text{Eflu}} = 0.36 + 0.12 + 0.52 + 0.0044 \cong 1=100\%$$

$$gc = \frac{n(\text{reagio})}{n(\text{alimentacao})} = \frac{n'_A}{n_A} \times 100\% \leftrightarrow gc = \frac{0.25\text{mol}}{0.25\text{mol}} \times 100\% = 100\%$$

### Cálculo de excesso do reagente (Excesso da água)

O excesso será calculado em função da quantidade total do resíduo que reagiu e em função da quantidade parcial. Como o resíduo foi adicionado 3 vezes, então:

$$n_{\text{total}(\text{Al})} = 0.25 * 3 = 0.75 \text{ mol}$$

$$\%R_{\text{Ex}(\text{H}_2\text{O})} = \frac{3.63-0.75}{3.63} \times 100\% \cong 80\%$$

$$\%R_{\text{Ex}(\text{H}_2\text{O})} = \frac{3.63 - 0.25}{3.63} \times 100\% \cong 93\%$$

O alumínio é o reagente limitante

### Cálculo do grau de conversão (gc)

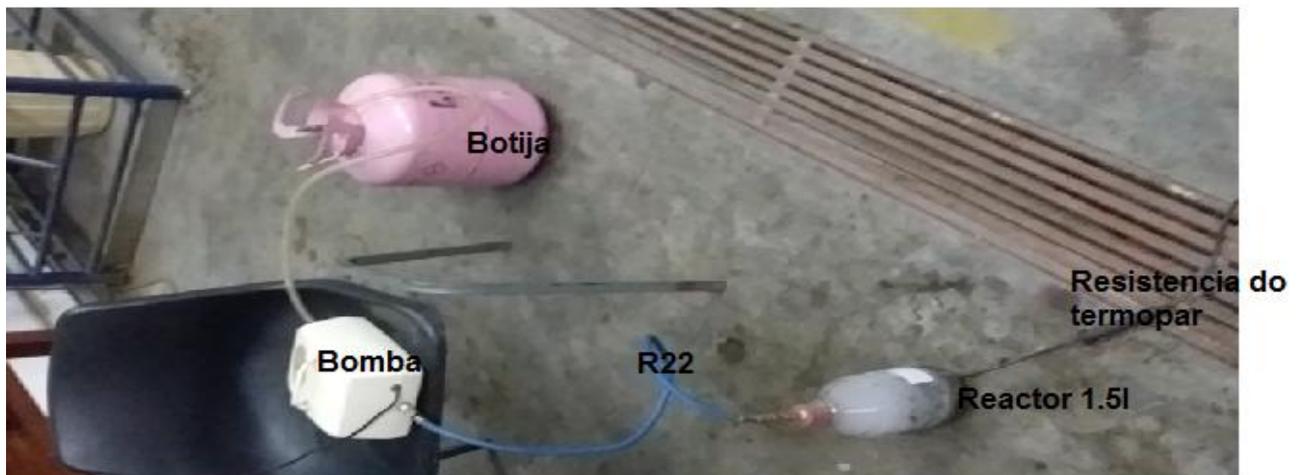
$$GC = \frac{n(\text{moles do reagente limitante que reagiu})}{n(\text{moles do reagente limitante na alimentacao})} = \frac{n'_A}{n_A} \times 100\% \leftrightarrow gc = \frac{0.75\text{mol}}{0.75\text{mol}} \times 100\% = 100\%$$

### A3.2 Resultados de balanço mássico no reactor apos a redução da quantidade de alumínio-2º Experimento

	A	XA	B	XB	C	XC	D	XD	E <sub>Efluente</sub>	X <sub>Efluente</sub>
NaOH	0.1kg	0.98	-	-	0.163kg	0.6	-		0.08798kg	0.52
H <sub>2</sub> O	-	0.02	63.3ml	1.0		0.4	-		0.06082kg	0.36
Al	-	-	-	-	-	-	0.00675kg	1.0	-	
Na <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-		0.0205kg	0.12
H <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-		0.00075kg	0.0044
<b>Total</b>	0.1kg	1	63.3ml	1	0.163kg	1	0.00675kg	1	0.17kg	≅ 100%

Fonte: (Autor 2021)

### A3.3 - Alimentou-se o gás produzido para uma botija, através da bomba de sucção compressão



Fonte: (Autor 2021)

### A3.4 : Registro do peso



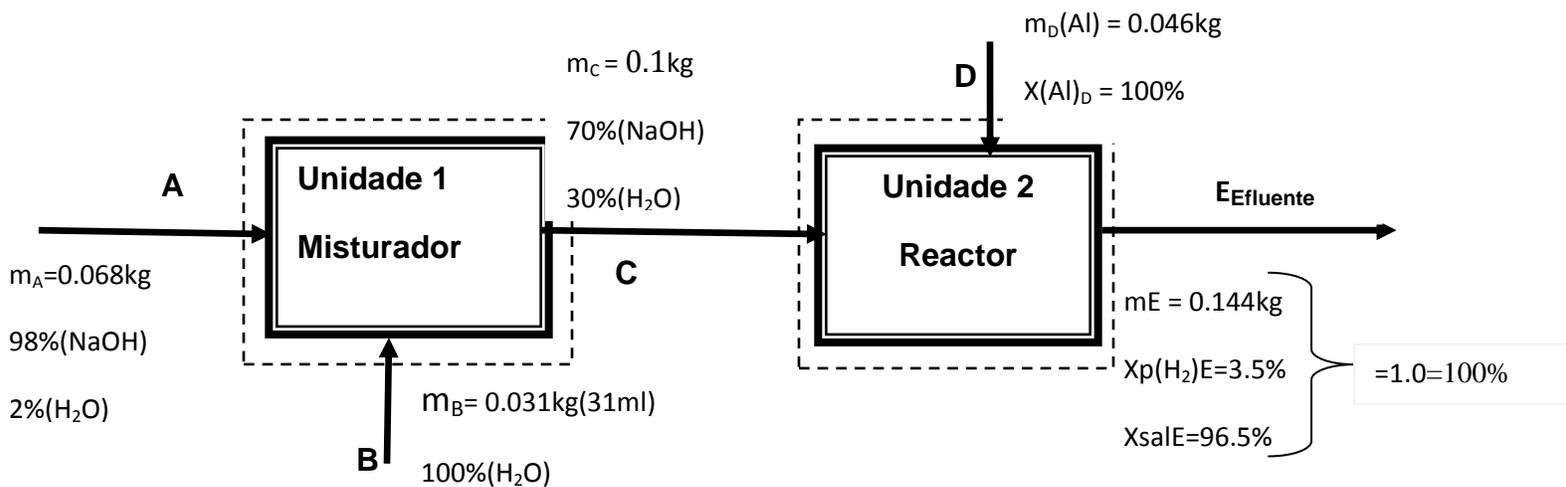
Fonte:(Autor 2021)

$$m_1 = 3,540\text{kg}$$

$$m_2 = 3,535\text{kg}$$

$$\Delta m = 3.540 - 3.535 = 0.005\text{kg} = 5\text{g de } H_2$$

### Anexo 4: A4.1 Diagrama de Balanço Para o Gás Contido na Botija 11kg



$$n_{pE} = n_{H_2} = \frac{(0.005\text{kg} * 1000)\text{g}}{2\text{g/mol}} = 2.5\text{mol de } H_2$$

**O alumínio que reagiu para formar hidrogénio:**

$$E(\text{entrada}) - S(\text{saida}) + G(\text{geracao}) - C(\text{consumo}) = 0 \rightarrow S = E - C = 0$$

$$\begin{array}{c} \swarrow \quad \searrow \\ \frac{3\text{mol}}{[H_2]} \cong \frac{2\text{mol}}{[Al]} \\ \swarrow \quad \searrow \\ \frac{2.5\text{mol}}{Z_1} \quad \frac{1.7\text{mol}}{Z_1} \end{array} \quad Z_{Al} \text{mol} = 1.7\text{mol de (Al)} \leftrightarrow m(\text{Al}) = n * \text{PM} = 1.7\text{mol} * \frac{27\text{g}}{\text{mol}} = 46\text{g} = 0.046\text{kg}$$

$m_D = 0.046\text{kg}$  Massa de residuo de alumínio que poderia reagir para formar 0.005kg de hidrogénio

$$\begin{array}{c} 2\text{mol} \quad 2\text{mol} \\ [Al] \cong [NaOH] \\ 1.7\text{mol} \quad Z_{KOH} \text{mol} \end{array} \quad Z_{KOH} = n_{KOH} = 1.7\text{mol} \leftrightarrow m_{KOH} = 1.7\text{mol} * \frac{40\text{g}}{\text{mol}} = 68\text{g} = 0.07\text{kg}$$

0.07kg Massa de NaOH que poderia reagir para formar 0.005kg de hidrogénio

$$\begin{array}{c} 2\text{mol} \quad 2\text{mol} \\ [Al] \cong [H_2O] \\ 1.7\text{mol} \quad Z_{H_2O} \text{mol} \end{array} \quad Z_{H_2O} = n_{H_2O} = 1.7\text{mol} \rightarrow m = 1.7\text{mol} * \frac{18\text{g}}{\text{mol}} = 30.6\text{g} = 0.031\text{kg}$$

0.031kg Massa de H<sub>2</sub>O que poderia reagir para formar 0.005kg de hidrogénio

**Balanco global na Unidade 1 (U1):**

$$m_C = ?$$

$$m_A + m_B = m_C \leftrightarrow m_C = 0.068\text{kg} + 0.031\text{kg} = 0.099\text{kg} \cong 0.1\text{kg}$$

**Balanço por componente**

$$\mathbf{A} \left\{ \begin{array}{l} m_A = 0.068\text{kg} \\ X_{hA} = 98\% \\ X_{wA} = 2\% \end{array} \right.$$

$$\mathbf{B} \left\{ \begin{array}{l} m_B = 0.031\text{kg} \\ X_{hB} = 0.0\% \\ X_{wB} = 100\% \end{array} \right.$$

$$\mathbf{C} \left\{ \begin{array}{l} m_C = 0.099\text{kg} \\ X_{hC} = ? \\ X_{wC} = ? \end{array} \right.$$

### Balanço da água (w)

$$m_A X_{wA} + m_B X_{wB} = m_C X_{wC}$$

$$0.068\text{kg} * 0.02 + 0.031\text{kg} * 1 = 0.099\text{kg} * X_{wC}$$

$$X_{wC} = \frac{0.068\text{kg} * 0.02 + 0.031\text{kg} * 1}{0.099\text{kg}} \cong 0.3 = 30\%$$

$$X_{hC} = 1 - X_{wC} = 1 - 0.3 \cong 0.7 = 70\%$$

### Balanço global na Unidade 2 (U2)

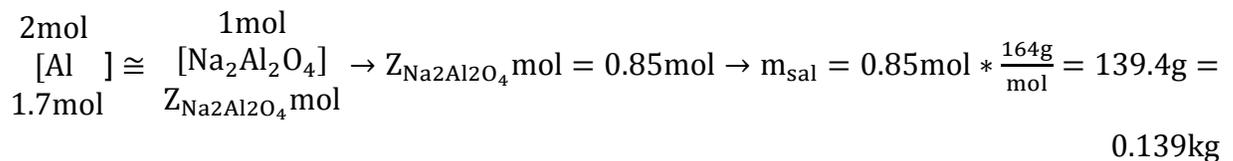
$$m_C + m_D = m_{\text{Efluente}} \leftrightarrow 0.1\text{kg} + 0.046\text{kg} = 0.005\text{kg}(\text{hidrogenio}) + m_{\text{sal}}$$

$$m_C + m_D = m_{\text{Efluente}}$$

### Balanço por componente -unidade-2 (U2)

{	<b>C</b>	{	$m_C = 0.1\text{Kg}$	{	<b>D</b>	{	$m_D = 0.046\text{kg}$	{	<b>E</b>	{	$m_E = 0.144\text{kg}$
	$X_{wC} = 30\%$	$X_{hD} = 0,0\%$	$X_{wE} = ?$								
	$X_{hC} = 70\%$	$X_{alD} = 100\%$	$X_{alE} = ?$								
			$X_{wD} = 0,0\%$				$X_{hE} = ?$			$X_{pE} = ?$	

### Balanço por componente (sal) Sal que poderia reagir com reagente limitante para formar hidrogênio.



$$m_{\text{Efluente}} = m_{\text{sal}} + m_{pE} = 0.139 + 0.005 = 0.144\text{kg}$$

$$X_{\text{sal}} = \frac{0.139\text{kg}}{0.144\text{kg}} * 100\% \cong 0.965 * 100\% = 96.5\% \quad X_{pE} = \frac{0.005\text{kg}}{0.144\text{kg}} * 100\% \cong 0.035 = 3.5\%$$

$$X_{\text{sal}} + X_{pE} = 96.5\% + 3.5\% = 100\%$$

### Razão Teórica e Prática dos Reagente

$$R_{T\frac{H_2O}{Al}} = \frac{2}{2} = 1 \quad R_{P\frac{H_2O}{Al}} = \frac{1.7mol}{1.7mol} = 1 \rightarrow R_P = R_T$$

$$R_{T\frac{NaOH}{Al}} = \frac{2}{2} = 1 \quad R_{P\frac{NaOH}{Al}} = \frac{1.7}{1.7} = 1 \rightarrow R_P = R_T$$

$$gc(Al) = 100\%$$

### A4.2 Resultados de balanço mássico considerando a massa do gás hidrogénio contido na botija.

	A	XA	B	XB	C	XC	D	XD	E <sub>Efluente</sub>	X <sub>Efluente</sub>
NaOH	0.07kg	0.98	-	-	0.1Kg	0.7	-		-	
H <sub>2</sub> O	-	0.02	31ml	1.0		0.3	-		-	
Al	-	-	-	-	-	-	0.046kg	1.0	-	
N <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-		0.139kg	96.5%
H <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-		0.005kg	3.5%
<b>Total</b>	0.07kg	1	31ml	1	0.1Kg	1	0.046kg	1	0.14kg	100%

Fonte: (Autor, 2022)

Esta tabela ilustra de uma forma clara as quantidade exatas de hidróxido, água e latas de alumínio que seriam usadas para produzir 0.005Kg de gás hidrogénio que foi armazenado na botija de 11kg.

$$V(H_2) = \frac{nRT}{P} = \frac{\frac{5g}{6g/mol} * 0.082 * 298k}{1atm} = 20l$$

### Massa total de hidróxido de sódio usada no experimento 1° e 2° M<sub>T</sub> (NaOH)

$$M_T (NaOH) = 0.1Kg + 0.1Kg = 0.2Kg = 200g \text{ de hidróxido de sódio}$$

### Massa total de resíduo de alumínio usado no experimento 1° e 2° M<sub>T</sub>(Al)

$$M_T(Al) = 0.00675Kg + 0.0675Kg = 0.0743Kg = 74.3g \text{ de resíduo de alumínio foram usados}$$

### Massa total da água usada no experimento 1° e 2° M<sub>T</sub>(H<sub>2</sub>O)

$$M_T(\text{H}_2\text{O}) = 0.0633\text{Kg} + 0.0633\text{Kg} = 0.1266\text{L} = 126.6\text{ml}$$

**Massa total de hidrogénio produzido no experimento 1º e 2º  $M_T(\text{H}_2)$**

$M_T(\text{H}_2) = 0.0075\text{Kg} + 0.00075 \cdot 3\text{Kg} = 0.01\text{Kg} = 10\text{g}$  de gás que seria produzido se não existisse escapamento.

$$V(\text{H}_2) = \frac{nRT}{P} = \frac{\frac{10\text{g}}{2\text{g/mol}} * 0.082 * 298\text{k}}{1\text{atm}} = 41\text{L de H}_2$$

## Anexo 5: Eficiência energética e Características

### A5.1. -As importantes características do hidrogénio são apresentadas na tabela

Características	Unidades	Valor
Densidade	Kg/m <sup>3</sup>	0.0838
Maior poder calorífico (HHV) hidrogénio liquefeito (LH <sub>2</sub> )	MJ/Kg	141.90 - 119.90
HHV/gas de hidrogénio criogénico (CGH <sub>2</sub> )	MJ/m <sup>3</sup>	11.89 – 10.05
Ponto de ebulição	K	20.41
Ponto de fusão	K	13.97
Densidade (líquido)	Kg/m <sup>3</sup>	70.8
Coeficiente de difusão do ar	cm <sup>2</sup> /s	0.61
Calor específico	kJ/kg K	14.89
Limites de ignição no ar	%(Volume)	4-75
Energia de ignição no ar	Mil joules	0.02
Temperatura de ignição	K	585.00
Temperatura da chama no ar	K	2318.00
Energia de explosão	Kj/g TNT	58.823
Emissividade da chama	%	17 – 25
Mistura estequiométrica no ar	%	29.53
Estequiometria ar/combustível	Kg/kg	34.30/1
Velocidade de queima	cm/s	2.75
Factor de reserva de potencia	-	1.00

(Reluca Felseghi, 2019)

## A5.2 A eficiência Energética de Hidrogénio e o Factor de Emissão Comparativamente aos Outros Combustíveis-

Tipo de combustível	Energia por unidade de Massa (J/kg)	Energia por unidade de volume (J/m <sup>3</sup> )	Factor de reserva de energia	Factor de emissão específico de carbono (KgC/ Kg Fuel)
<b>Hidrogénio líquido</b>	141.90	10.10	1.00	0.00
<b>Hidrogenio gasoso</b>	141.90	0.013	1.00	0.00
<b>Óleo combustível</b>	45.50	38.65	0.78	0.84
<b>Gasolina</b>	47.40	34.85	0.76	0.86
<b>Combustível de avião</b>	46.50	35.30	0.75	-
<b>GPL</b>	48.80	24.40	0.62	-
<b>GNL</b>	50.00	23.00	0.61	-
<b>Metanol</b>	22.30	18.10	0.23	0.50
<b>Etanol</b>	29.90	23.60	0.37	0.50
<b>Biodisel</b>	37.00	33.00	-	0.50
<b>Gas natural</b>	50.00	0.04	0.75	0.46
<b>Carvão</b>	30.00	-	-	0.50

(Reluca Felseghi, 2019)

**Anexo A6: Tabela de avaliação de risco segundo método de M.A.R.A.T para a segurança adotada no experimento**

Actividade/ /Material/pro ducto	Perigos	Riscos	Dano/ Consequência	Avaliação de Riscos			Classificaç ão GR	Medidas de Controlo
				NC	NP	GR		
<b>Espaço de trabalho (Laboratório de operações)</b>	Desorganização nas bancadas	Queda de objectos desprendidos	Contusão	10	4	40	Moderado	Organização
	Equipamento de calcinação	Operação há uma temperatura acima de 500°, próximo a bancada do reactor	Explosão	60	15	900	Alto	Organização, fechamento da porta do equipamento de calcinação.
	Limpeza nas bancadas`	Contacto com substâncias estranhas derramadas nas bancadas	Contaminação da pele	25	6	150	Substancial	Acções de Limpeza nas bancadas
	Odor	Exposição ao odor de um biodigestor	Inalação de gases	25	8	200	Substancial	Remoção dos gases (CO2; Metano) em espaços apropriados; fechamento das fugas
	Circulação de estudantes no laboratório sem a devida	Contacto com substâncias e equipamentos	Contaminação; destruição de equipamentos	25	8	200	Substancial	Proibir a circulação de estudantes não autorizados

	autorização								
<b>Resíduos (Latas)</b>	Segregação de resíduos	Contacto com substâncias contaminantes	Contaminação das mãos	10	2	20	Aceitável	Uso de luvas; descontaminação dos resíduos	
		Contacto com parte cortante da tesoura	Cortes	10	5	50	Moderado	Uso de luvas anti-corte	
<b>Base Forte</b>	Pesagem de ( NaOH)	Contacto com (NaOH)	Queimadura, acidentes graves	10	2	20	Aceitável	Uso de EPI (luvas, óculos)	
<b>Reactor</b>	Partes removíveis	Remoção da rolha espontaneamente	Contusão	60	15	900	Alto	Reduzir a quantidade de reagentes no reactor. Remover manualmente a rolha antes de aumentar a pressão do gás	
		Operação de produção de gás (hidrogénio)	Exposição a explosão	Queimaduras, lesões, acidentes graves	70	15	1050	Alto	Aumentar o arejamento natural no laboratório, emitir o gás para o meio ambiente,
			Exposição a temperaturas elevadas	Queimaduras, lesões, acidentes graves.	70	15	1050	Alto	Aliviar a pressão do gás no reactor, emitir o gás para o meio ambiente.

								Reduzir a quantidade de reagentes no reactor
		Destruição do reactor	Lesões, Queimaduras.	10	5	50	Moderado	Aliviar a pressão do gás no reactor, emitir o gás para o meio ambiente.
Botija de gás (11kg)	Alimentação do gás na botija	Armazenamento e alimentação do hidrogénio na botija em via de degradação	Destruição da botija, desperdício de gás, Fadiga	60	15	900	Alto	Uso de uma botija adequada, uso de uma célula de combustível.

Fonte: (Autor 2022)

#### **ANEXO 7: Resíduos Plástico Resultantes da Reciclagem de Latas de Alumínio e Papel Alumínio (Fonte. Autor, 2021)**

