

FACULDADE DE ENGENHARIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

Estudo da Eficiência do Transportador Pneumático Vertical Ascendente de Alumina Fluorada do Centro de Tratamento de Gases da MOZAL

Autor:

Welka Solange Edgar Cossa

Supervisor:

Prof. Dr. Eng.º Fabião Manuel Alfredo Cumbe

Maputo, Junho de 2024



FACULDADE DE ENGENHARIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

Estudo da Eficiência do Transportador Pneumático Vertical Ascendente de Alumina Fluorada do Centro de Tratamento de Gases da MOZAL

Autor:

Welka Solange Edgar Cossa

Supervisor:

Prof. Dr. Eng.º Fabião Manuel Alfredo Cumbe

Maputo, Junho de 2024

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que a estudante Welka Solange Edgar Cossa entregou no dia ____/2024 as três copias do relatório do seu Trabalho de licenciatura com a referência: ______, intitulado: Estudo da Eficiência do Transportador Vertical Ascendente de Alumina Fluorada do Centro de Tratamento de Gases da MOZAL.

Maputo, _____ de _____ de 2024

Chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Welka Solange Edgar Cossa, declaro, sob palavra de honra, que o presente trabalho de licenciatura, com o tema: **Estudo da Eficiência do Transportador Vertical Ascendente de Alumina Fluorada do Centro de Tratamento de Gases da MOZAL**, que apresento para o cumprimento dos requisitos para a obtenção do grau de licenciatura em Engenharia Mecânica, foi inteiramente por mim realizado, com base nos recursos que no mesmo se fazem referência.

Maputo, _____, de _____ de 2024

(Welka Solange Edgar Cossa)



"Combati o bom combate, terminei a corrida, guardei a fé"

2 Timóteo 4:7



DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Edgar Alfredo Cossa e Elisa Eduardo Madime, às minhas irmãs, Evandra Cossa, Neusa Cossa, Vanessa Cossa, Dirce Cossa e Edlisa Cossa, pelo apoio incondicional, dedicação e confiança que sempre depositaram em mim e aos meus tios Martins Madime e Mateus Cossa, que tanto gostariam de presenciar este momento e sempre me apoiaram.



AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer a Deus por todo amor, força e sustento durante todo o meu percurso estudantil e pela sua perfeita e agradável vontade e propósito na minha vida.

Agradecer aos meus pais e às minhas irmãs por sempre acreditarem no meu potencial e despertar sempre o melhor de mim, por sempre verem além das minhas capacidades e me encorajar diariamente a enfrentar cada obstáculo e por constituírem o maravilhoso sistema de suporte que são para mim.

Agradecer aos meus tios Henrique Madime e Cipriano dos Santos por sempre acompanharem de perto a minha caminhada, encorajar a alcançar os meus objetivos e apoiar-me sempre.

Agradecer à MOZAL pela oportunidade de fazer parte do projecto "Mulher na indústria" desde o princípio e pelo apoio, dedicação e encorajamento, em especial ao Dias Bande, pelo apoio e acompanhamento durante todo o processo, que incansavelmente colaborou e certificou que corria da melhor forma possível.

Agradecer ao meu supervisor, Issufo Sumalgy, aos colegas Januário Mujovo, Daud Baiat, Evaristo Nhabomba, Jaime Monjane e a todos os colegas da team *Challengers* pela imensa dedicação e apoio, agradecer ao meu co-supervisor Luís Mata e ao Manuel Cumbi pelo encorajamento e acompanhamento na realização deste trabalho, o apoio de todos os colegas foi determinante no sucesso deste trabalho e serei eternamente grata.

Agradecer à Universidade Eduardo Mondlane, a todo o corpo docente da Faculdade de Engenharia pelos ensinamentos e lições que levarei para toda a vida, especialmente ao meu supervisor, Fabião Cumbe, pela dedicação, paciência, encorajamento e apoio na elaboração deste trabalho de licenciatura e pelo encorajamento para continuar neste ramo ao longo da minha caminhada estudantil.

Agradecer às minhas amigas, Cláudia Soares, Diandra Chioze, Gabriela Rafael, Shonyl Chemane e Ulla Chemane pelo suporte que sempre tem representado para mim e pelo apoio incondicional deste o início desta caminhada, aos meus meus colegas que se tornaram família, e tiveram imensurável influência nesta caminhada, Dirceu Boca, Zacarias Pacheco, Hugo Chea, Nélia Zunguene, Youndy Magaia, Jorge Durão, Micas Sarmento, Juvêncio Chimbutane, Marcelo Albuquerque, António Uele e Albino Tamele.

Agradecer aos meus irmãos em Cristo pelo apoio incondicional e força, especialmente, Inelda Tembe, Valter Almeida, Ribas Guambe, Kenny Wate e Amândio Kupela.



RESUMO

Este trabalho de licenciatura apresenta o estudo da eficiência do transportador pneumático vertical de alumina fluorada do Centro de Tratamento de Gases (CTG) da MOZAL, que consiste na análise do seu funcionamento, de modo a garantir a recirculação de alumina no processo de tratamento dos gases provenientes da redução electrolítica de alumina.

Aquando da implementação da tecnologia AP3XLE, que visa aumentar a produção reduzindo o consumo de energia eléctrica, conferindo ao processo maior eficiência energética, de modo a atingir uma produção anual de 19.000 toneladas, melhorias foram realizadas no transportador em causa e para suprir a sua demanda, foi sugerida a adição de ar comprimido, como alternativa para melhor fluidização da alumina fluorada. O presente trabalho visa analisar a eficiência do transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada, consequentemente analisando os seus parâmetros de funcionamento e devolvendo ao mesmo os seus parâmetros padronizados.

Para a realização do trabalho, foram necessários dados como as pressões do compressor, de transporte e de fluidização e dados para análise do fluxo volumétrico de ar comprimido como temperatura e pressões dinâmica e estática, que foram determinantes na análise.

A análise da eficiência foi acompanhada de propostas de melhoria e foram implementadas com sucesso, com recurso ao aplicativo informático *Trend*, que teve grande importância na monitoria do mesmo, assim como na análise da viabilidade económica.

O presente trabalho avalia a eficiência do transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada do CTG 2 apresentando em média uma eficiência de 64.87% e um decréscimo de 3.96% de consumo de ar comprimido, o que corresponde a uma economia de energia em 157960.07 kWh, equivalente a 1,333,183.01 MZN por mês, demonstrando a performance do mesmo após a implementação da tecnologia AP3XLE.

Palavras-chave: Transportador pneumático, ar comprimido, fluidização, alumina.



ABSTRACT

This undergraduate thesis presents the study of the fluorinated alumina airlift in the Gas Treatment Center (GTC) at MOZAL, which consists of analyzing its operation, in order to guarantee the recirculation of alumina in the process of gas treatment from the electrolytic reduction of alumina.

When implementing the AP3XLE technology, which aims to increase production by reducing electrical energy consumption, giving the process greater energy efficiency, in order to reach an annual production of 19.000 tons, improvements were made in the airlift and to meet its demand, the addition of compressed air was suggested as an alternative for better fluidization of fluorinated alumina. The present work aims to analyze the efficiency of the fluorinated alumina airlift, consequently analyzing its operating parameters and returning its standardized parameters.

To carry out the work, data such as compressor, transport and fluidization pressures and data for analyzing the volumetric flow of compressed air, such as temperature and dynamic and static pressures, were necessary, which were decisive in the analysis.

The efficiency analysis was accompanied by improvement proposals and were successfully implemented, using the Trend computer application, which had great importance in monitoring it, as well as in analyzing economic viability.

The present work evaluates the efficiency of the fluorinated alumina airlift at GTC 2, presenting an average efficiency of 64.87% and a decrease of 3.96% in compressed air consumption, which corresponds to an energy saving of 157960.07 kWh, equivalent to 1,333,183.01 MZN per month, demonstrating its performance after implementing AP3XLE technology.

Keywords: Airlift, compressed air, fluidization, alumina.



ÍNDICE

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA	i
DECLARAÇÃO DE HONRA	II
DEDICATÓRIA	IV
AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	Х
ÍNDICE DE TABELAS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURA E ACRÓNIMOS	XII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Introdução	1
1.2. Estrutura do trabalho	2
1.3. Objectivos	3
1.4. Metodologia	4
1.5. Breve Historial da empresa	5
2. ESTADO DA ARTE	6
2.1. Histórico da produção de alumínio	6
2.1.1. Matéria-prima na produção de alumínio	7
2.1.2. Processos de produção de alumínio	10
2.2. Centro de tratamento de gases	12
2.2.1. Princípio de funcionamento	12
2.2.2. Circuito de alumina primária	13
2.2.3. Circuito de alumina secundária	14
3. COMPRESSÃO DE AR	16
4. SISTEMAS DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO	17
4.1. Fases do transporte pneumático	18
4.1.1. Fase Diluída	18
4.1.2. Fase Densa	20
4.2. Regimes de escoamento	22
4.2.1. Velocidade para o transporte em fase diluída	23



4.5.2. Velocidade de afogamento no transporte vertical	. 24
5. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO TRANSPORTE DE ALUMINA FLUORADA	. 26
5.1. Eficiência do compressor de lóbulos (roots)	. 26
5.2. Eficiência energética	. 27
5.3. Eficiência do transportador pneumático vertical ascendente	. 31
6. PROCESSAMENTO DE DADOS	. 34
6.1. Apresentação dos Dados	. 34
6.2. Análise e discussão dos resultados	. 40
7. VIABILIDADE ECONÓMICA DO PROJECTO	. 43
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	. 44
8.1. Conclusões	. 44
8.2. Recomendações	. 45
9. BIBLIOGRAFIA	. 46
Anexos	1



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de obtenção de alumina (Al ₂ O ₃)	7
Figura 2 - Ánodo pré-cozido	9
Figura 3 - Fluxograma do processo Hall-Héroult1	1
Figura 4 - Diagrama de fluxo do Centro de Tratamento de Gases12	2
Figura 5 - Fluxograma do processo de tratamento de gases a seco 13	3
Figura 6 – Fluxograma do circuito de alumina primária1	4
Figura 7- Fluxograma do circuito de alumina secundária1	5
Figura 8 - Diagrama de Pressão em função do volume do processo de compressão 1	6
Figura 9 - Zonas de transporte pneumático1	7
Figura 10 - Linha de transporte em fase diluída1	9
Figura 11 - Linha de transporte em fase densa2	0
Figura 12 - Mudança de fase diluída para a fase densa2	1
Figura 13 - Características gerais do transporte pneumático para fase diluída, zona	а
instável e fluxo em golpes de golfadas2	2
Figura 14 - Características da fase diluída2	3
Figura 15 - Diagrama de fase para transporte vertical de fase diluída, mostrando a relação	0
geral entre gradiente de pressão $\Delta P / \Delta L$ e a velocidade do gás2	5
Figura 16 - Diagrama da Pressão em função do volume do compressor de lóbulos 2	6
Figura 17 - Diagrama de compressão do compressor de lóbulos2	7
Figura 18 – Perfil de velocidades em tubagem regular	8
Figura 19 - Detecção de fugas no compressor	0
Figura 20 - Detecção de fugas no transportador pneumático vertical ascendente de	е
alumina fluorada	1
Figura 21 - Transportador pneumático vertical ascendente	2
Figura 22 - Regimes de fluidização em função da velocidade superficial do gás 3	3
Figura 23 - Gráfico de funcionamento do transportador pneumático vertical ascendent	е
de alumina fluorada do CTG 2	7
Figura 24 – Ilustração da taxa de ocupação do material no transportador pneumátic	0
vertical ascendente de alumina fluorada aquando da experiência	7
Figura 25 - Gráfico de funcionamento do transportador pneumático vertical ascendente	e
de alumina fluorada do CTG 2 com o compressor de lóbulos 001 em funcionamento. 3	8
Figura 26 - Gratico de funcionamento do transportador pneumático vertical ascendent	e
de alumina fluorada do CTG 2 com o compressor de lóbulos 002 em funcionamento. 3	9
Figura 27 - Curva do compressor de lóbulos do transportador pneumático vertical 4	0



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades típicas da alumina utilizada na célula electrolítica	8
Tabela 2 - Características dos sistemas pneumáticos em fases densa e diluída	. 18
Tabela 3 – Valores máximos e mínimos de pressão e fluxo volumétrico	. 40
Tabela 4 - Parâmetros dos equipamentos no antes e depois da implementação	da
tecnologia AP3XLE.	. 41
Tabela 5 - Avaliação económica comparativa de consumo de ar comprimido	. 43
Tabela 6 – Estimativa de consume anual	. 43



LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURA E ACRÓNIMOS

%	Percentagem
\propto	Ângulo de inclinação
∝- Al₂O₃	Grau de concentração de alumina
γ	Coeficiente isentrópico
ΔL	Unidade de comprimento
ΔP	Gradiente de pressão
Е	Rugosidade da parede interna da conduta
f	Coeficiente de atrito de Darcy
η	Eficiência
λ	Coeficiente linear de perdas de pressão por atrito em tubos
μm	Micrómetros
$ ho_p$	Densidade das partículas
$ ho_{ALF_3}$	Densidade de alumina fluorada
°C	Graus Celsius
А	Ampere
Al	Alumínio
AI(OH)3	Hidróxido de alumínio
Al ₂ O ₃	Oxido de alumínio-alumina
AICI₃	Cloreto de alumínio
AIF ₃	Fluoreto de alumínio
AP3XLE	Projecto de eficiência energética implementado na MOZAL
B.E.T.	Brunauer, Emmett and Teller
cm ³	Centímetros cúbicos
CTG/ GTC	Centro de tratamento de gases/ Gas Treatment Center
dm ³	Decímetros cúbicos
D _H	Diâmetro hidráulico
g	Gramas
g	Gravidade
G	Caudal de sólidos
h	Hora
h	Altura do transportador
h _f	Perda de carga
HF	Acido fluorídrico
J	Joule
k	Quilo
ĸ	Kelvin
кд	Kilogramas
	Litros
log	Logaritmo
L	Comprimento
L.O.I.	Loss Ot Igition (Perda por ignição)



М	Mega
m²	Metros quadrados
m ³	Metros cúbicos
min	Minutos
MOZAL	Moçambique Alumínios
MZN	Meticais
N	Newton
Na ₃ AIF ₆	Fluoreto de sódio e alumínio
NaAICI4	Tetracloroaluminato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
O ₂	Oxigénio molecular
Pa	Pascal
Q	Fluxo volumetrico
Q	Vazão
Re	Número de Reynolds
RPM	Rotações Por Minuto
S	Segundos
t/ ton	Toneladas
u	Massa atómica
U _{mf}	Velocidade superficial
u.m.a.	Unidade de massa atómica
V	Voltagem
V	Velocidade
W	Watt
W	Trabalho
Z	Número atómico
Z	Altura da conduta



1. INTRODUÇÃO

1.1. Introdução

Moçambique é um país situado na África Austral, com crescente potencial nas indústrias energética, extrativa e metalúrgica, dentre as quais o alumínio tem grande importância e alto valor comercial pelo seu vasto campo de aplicação, sendo este o metal mais abundante na crosta terrestre.

A produção do alumínio primário é pelo processo Hall-Héroult, que até aos actuais dias é o mais usado nas indústrias, inclusive na MOZAL (Moçambique Alumínios). Neste processo, o alumínio resulta da redução eletrolítica da alumina dissolvida num banho de fluoretos fundidos.

Aquando do processo de redução, gases fluorados são gerados e tratados no Centro de Tratamento de Gases (CTG), onde gases nocivos provenientes do processo de redução são injectados no reactor e pelo processo de adsorpção são capturados pela alumina fresca e a alumina fluorada (primária e secundária, respectivamente) é reutilizada e retorna ao processo, aos potes eletrolíticos e os gases tratados são libertos à atmosfera, salvaguardando a saúde da comunidade e dos colaboradores. Os gases nocivos são catalizadores e são reciclados (flúor) e retornam ao processo, ao CTG.

O presente trabalho é realizado no contexto do estudo da eficiência do transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada que fora modificado no contexto da implementação da tecnologia AP3XLE, visando aumentar a produtividade com menos consumo de energia, onde mudanças foram realizadas com vista a atingir o objetivo desejado, dentre eles o redimensionamento dos transportadores vibratórios de alumina fresca e de alumina fluorada e os transportadores pneumáticos verticais ascendentes de alumina fresca e de alumina fluorada dos CTGs, assim como os seus parâmetros de funcionamento e a sua amperagem.

O estudo visa investigar a eficiência do transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada, tendo como campo de estudo a empresa MOZAL (Moçambique Alumínios), sediada na província de Maputo, no distrito de Boane, especificamente no CTG número 2 e é de extrema importância para a eficácia do processo e funcionamento da indústria, pois contribui significativamente para a produção do alumínio, assim como para a garantia dos níveis de emissões de gases aceitáveis para a atmosfera.



1.2. Estrutura do trabalho

O presente trabalho de licenciatura é composto por 8 capítulos, com a seguinte estrutura:

O capítulo 1 apresenta a introdução, os objectivos geral e específicos, a metodologia usada para efectuar a investigação em causa e o breve historial da indústria onde a mesma foi realizada.

O capítulo 2 apresenta o histórico da indústria de produção de alumínio, a sua matéria prima, os seus processos de fabricação e o centro de tratamento de gases, dando ênfase ao sistema pertencente ao equipamento cujo objecto de estudo foi para a presente tese de licenciatura.

O capítulo 3 apresenta os princípios termodinâmicos para a compressão de ar.

O capítulo 4 aborda de forma detalhada e específica os sistemas de transporte pneumático e os seus parâmetros e variáveis relevantes ao sistema.

O capítulo 5 aborda questões referentes à análise da eficiência do sistema de transporte pneumático vertical ascendente de alumina fluorada, considerado a sua componente energética, o seu elemento executor de transporte e o próprio transportador.

O capítulo 6 apresenta os dados colhidos aquando investigação, acompanhado de análise e discussão, recorrendo ao aplicativo informático *Trend* e ao Microsoft Excel para efeitos de cálculo.

O capítulo 7 aborda a componente econômica que acompanha a análise da sua eficiência, analisando de acordo com os testes e experiências feitas em campo e fazendo uma análise mensal e anual dos recursos dispendidos.

O capítulo 8 apresenta as conclusões e recomendações do estudo realizado.



1.3. Objectivos

1.3.1. Objectivo geral

Investigar a eficiência do transportador pneumático de alumina fluorada no Centro de Tratamento de Gases da Mozal

1.3.2. Objectivos específicos

De forma a alcançar o objetivo geral foram traçados objetivos específicos que conduzirão o estudo de forma a obter resultados e conclusões coerentes, sendo estes:

- Medir a pressão no compressor de lóbulos de ar do transportador pneumático vertical de alumina fluorada na presença e na ausência de ar comprimido;
- Medir a queda de pressão ao longo da conduta;
- Determinar a curva do compressor de lóbulos de ar do transportador pneumático de alumina fluorada;
- Comparar as especificações padrão com as de funcionamento.



1.4. Metodologia

O presente trabalho de licenciatura segue uma metodologia baseada na revisão bibliográfica, exposição ao campo, recolha de dados e análise de dados, assente numa abordagem científica e investigativa.

1. Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica foi baseada na leitura de artigos científicos, dissertações, manuais e apontamentos referentes ao problema em causa, dando ênfase à produção de alumínio e ao tratamento de gases derivados da sua produção, assim como ao transporte pneumático de produtos granulares.

2. Exposição ao campo

O estudo de campo consiste na pesquisa localizada, de forma a compreender o princípio de funcionamento dos equipamentos e o processo, sustentado pela recolha de informação dos profissionais da área, de forma a apurar informação coesa para a concepção do presente trabalho, no caso, consiste na interação e monitoria do sistema de fluoração de alumina do CTG.

3. Recolha de dados

O levantamento de dados é feito no local de estudo, no caso, foram realizadas medições de pressões estática e dinâmica, da temperatura, medição do diâmetro da conduta e detecção de fugas de ar comprimido posterior análise. Esta recolha de dados foi feita com recursos aa instrumentos de medição como: anemômetro e respectivo tubo de *Pitot*, barômetro, tacômetro, câmera térmica e detector ultrassónico de fugas.

4. Análise de dados

A análise de dados consiste na averiguação dos mesmos, numa perspectiva crítica, de modo a obter resultados com precisão e coesão, recorrendo ao aplicativo informático *Trend*, disponibilizado pela companhia, para monitoria dos equipamentos e verificação dos parâmetros.

5. Compilação do trabalho

A compilação do trabalho é feita com base nos resultados obtidos e informações colhidas durante o período de exposição, relatando situações reais e constatadas durante o período.



1.5. Breve Historial da empresa

A MOZAL (Moçambique Alumínios) é uma empresa de fundição de alumínio, situada na Provincia de Maputo, distrito de Boane, no Parque Industrial de Beluluane, a 17 km Oeste de Maputo. actualmente operada pelo grupo *SOUTH 32* (Sul 32), fundada em 1998 e na altura operada pela B.H.P. Billiton. O processo de produção é realizado pelo processo Hall-Héroult, que consiste na redução de alumina por eletrólise fundida em células eletrolíticas. A empresa atinge uma produção diária de 1550 toneladas de alumínio.

O projecto Mozal foi lançado a 12 de Maio de 1998, em Londres e estabelecido em Moçambique em Julho de 1998, por um consorcio de empresas investidoras lideradas pela BHP Billiton. Actualmente conta com quatro acionistas, nomeadamente: *SOUTH 32* (47.1%), Industrial Development Corporation (25%), Mitsubishi (24%) e República de Moçambique (3.9%).

A empresa está dividida em dois grupos de departamentos: departamentos de operações e departamentos de serviços. O departamento de operações está subdividido pelas seguintes áreas: Carbono, Fundição, Redução, Tratamento e Logística, Manutenção e Engenharia, e por fim os departamentos de serviços está subdividido pelas seguintes áreas: Recursos Humanos, Finanças, Segurança, Saúde e Meio Ambiente e Assuntos Externos.

Os departamentos de operações estão directamente ligados à produção do alumínio, que é o foco desta indústria e estão repartidos em Manutenção, Produção e Processo, onde o primeiro é responsável pelo mantimento dos seus equipamentos e por traçar estratégias que garantam a sua manutibilidade e confiabilidade dos mesmos. Em seguida, a produção que é responsável por garantir a continuidade da produtividade e por fim, o Processo que é responsável por monitorar os processos de produção e optimizá-los.



2. ESTADO DA ARTE

2.1. Histórico da produção de alumínio

O alumínio (AI) é um elemento químico de número atômico z=13 e massa atómica u = 27 u.m.a (unidade de massa atómica), pertencente ao IIIA grupo da tabela periódica, sendo este um metal leve, enquadrado no grupo dos metais não ferrosos. Este metal possui características físico-químicas de grande relevância para a indústria como: baixa densidade, leveza, boa condutibilidade elétrica, baixo ponto de fusão, maleabilidade e ductilidade (facilmente usinado e moldado), além de excelente durabilidade e resistência a corrosão, tendo uma diversa aplicação nas indústrias aeronáutica, civil, metalúrgica, automobilística (Fonseca, 2018).

Em 1825, o físico e químico dinamarquês Hans Christian Ørsted foi o primeiro a isolar o metal, através da redução metalotérmica do cloreto de alumínio (AlCl₃), utilizando uma amalgama de potássio. Em 1827, Frederich Wöhler melhorou o método usando potássio metálico. Em 1854, Henry Saint Claire Deville tornou o processo economicamente viável, usando o tetracloroaluminato de sódio (NaAlCl₄) e no mesmo ano, Deville e R. W. Bunsen, independentemente, separaram o alumínio metálico por eletrólise fundida do mesmo. Em 1889 Charles Martin Hall e Paul Louis Héroult patentearam quase simultaneamente o processo de obtenção do alumínio, por meio da redução eletrolítica de alumina dissolvida em banho fundido de criolita. Em 1899 Karl Josef Bayer desenvolveu o processo de Bayer, que consiste na extração de alumina da bauxita (Lorena, 2022; Dias et al., 2019).

A produção de alumínio em África iniciou na década de 1940, na África do Sul e alguns dos países que eram conhecidos por produzir alumínio incluem Guiné, Moçambique, Egito e Gana. Guiné é um dos maiores produtores de bauxita, que é um mineral usado na produção de alumínio, mas no que concerne à produção de alumínio propriamente dita na Guiné não é tão significativa. Moçambique também possui depósitos de bauxita e conta com somente uma indústria de alumínio, a MOZAL.

A África do Sul tem uma história de produção de alumínio, principalmente na forma de alumínio primário (a partir da bauxita). A empresa BHP Billiton tinha operações de alumínio na África do Sul, embora tenha se desinvestido nesse sector em anos recentes.

O Egipto também tem sido um pequeno produtor de alumínio. A empresa Egyptian Aluminium Company (EGYALUM) opera instalações de produção de alumínio primário no país. O Gana tem depósitos de bauxita, e houve discussões sobre o desenvolvimento de uma indústria de alumínio naquele país.



2.1.1. Matéria-prima na produção de alumínio

2.1.1.1. Alumina

A alumina ou óxido de alumínio (Al₂O₃) provém da bauxita e é a matéria-prima no processo de produção do alumínio. Este é um composto químico constituído por alumínio e oxigénio e o seu processo de obtenção da inicia na extração da bauxita, que passa pelas etapas de britagem, que consiste na sua redução granulométrica, de refinação, que de acordo com SAMPAIO, et. al, 2012, envolve diversas etapas unitárias, como: digestão, separação da lama vermelha, cristalização do hidróxido de alumínio e calcinação.



Figura 1 - Processos de obtenção de alumina (Al₂O₃).

Fonte: [SAMPAIO, 2012]



Propriedades da alumina

Propriedades	Unidades	Valores
B.E.T.	m²/g	2 - 100
Densidade	kg/dm ³	0.95 – 1.05
Densidade picnométrica	kg/dm ³	3.4 - 3.6
LOI	%	0.3 – 1.5
Granulometria	μm	10 – 200
Partículas <45 µm	%	6 – 15
∝- Al₂O₃	%	3 – 25
Ângulo de repouso	0	30 – 35
Partículas > 150 µm	%	<10

Tabela 1- Propriedades típicas da alumina utilizada na célula electrolítica

Fonte: [MOURA, 2001]

2.1.1.2. Electricidade

A disponibilidade de energia na indústria de alumínio é crucial, especialmente devido à sua característica electrointensiva na produção (MASSARA, 2014).

O alumínio é produzido durante a eletrólise da alumina, que requer o uso de altas correntes de energia, tendo dois parâmetros principais que descrevem a performance das células electrolíticas e o custo de produção, nomeadamente: a eficiência da corrente e o consumo de energia (Silva, 2022).

A eficiência de corrente (EC) é um parâmetro tecnológico usado para descrever o desempenho do processo e pode ser definida como a razão entre o metal real produzido e a produção teórica, conforme demonstrado na seguinte equação (Silva, 2022; Kvande & Drabløs, 2014):

$$Eficiencia \ de \ corrente = \frac{Produção \ de \ alumínio \ metálico}{Produção \ teórica} \tag{1}$$

A eficiência energética é definida como a parte da energia elétrica (amperagem multiplicada pela voltagem) que é usada para produzir alumínio. Os valores típicos estão



apenas entre 45% e 50%, mesmo em células modernas, e restante da energia produz calor, que é expelido para o ambiente.

2.1.1.3. Ânodos de carbono

Os ânodos são os eléctrodos através dos quais a carga eléctrica flui para o interior das células electrolíticas durante a electrólise.

Existem dois tipos de ânodos usados na indústria de alumínio: únicos, que são cozidos no interior das células, ou os pré-cozidos, que são previamente sujeitos a altas temperaturas em fornos de cozedura apropriados, estes são utilizados na indústria em causa. Os ânodos possuem uma densidade que varia entre 1,45 g/cm³ a 1,6 g/cm³ e possui uma porosidade que corresponde a 30% do material. Estes podem ser maioritariamente produzidos de material condutor (ferro fundido) e são, normalmente, revestidos com uma camada fina de alumínio, visando retardar a oxidação do material (Lorena, 2022).



Figura 2 - Ánodo pré-cozido.

Fonte: [Silva, 2022]

Para a produção dos ánodos pré-cozidos o coque de petróleo é misturado ao piche, que atua como um aglutinante e a mistura adquire uma forma específica, moldada com uma prensa. O bloco de carbono formado é cozido em fornos para ser transformado num



bloco de carbono sólido. A corrente elétrica chega ao bloco de carbono por meio de uma haste e a corrente da linha pode suportar entre 14 a 40 ánodos únicos, que permanecem nas células electrolíticas por um período fixo de 26 a 30 dias. Em seguida, antes de serem totalmente consumidos, são retirados juntamente com a haste, e o carvão remanescente é reaproveitado para a produção de novos ânodos, optimizando o processo (Silva, 2022).

2.1.2. Processos de produção de alumínio

O alumínio pode ser produzido de duas formas, nomeadamente: redução carbotérmica de alumina e redução electrolítica de alumina. A redução eletrolítica da alumina, que é o processo usado em causa, é uma alternativa ao processo carbotérmico tradicionalmente usado para produzir alumínio, como o processo Hall-Héroult. Embora o processo de redução eletrolítica seja energeticamente intensivo devido à necessidade de eletricidade, ele oferece a vantagem de produzir alumínio de alta pureza e pode ser mais eficiente em termos de consumo de energia em comparação com o processo carbotérmico, dependendo das condições locais e tecnológicas (Silva, 2020).

2.1.2.1. Redução eletrolítica de alumina

A redução electrolítica de alumina tem como base o processo Hall-Héroult, que consiste na redução da alumina dentro de cubas ou células electrolíticas, estando ela dissolvida num banho de criolita (fluoreto de sódio e alumínio – Na₃AlF₆) e de fluoretos de um ou mais metais mais eletropositivos que o alumínio, nomeadamente: sódio, potássio ou cálcio. A reação de eletrólise que ocorre demanda uma elevada quantidade de energia elétrica, cerca de 15 MWh para produzir uma tonelada de alumino (Silva, 2020).

O processo químico da redução eletrolítica se desenvolve em fornos especiais revestidos de carbono, também conhecidos como células electrolíticas, as quais operam na faixa de temperatura de 940 a 980 °C. Cada célula possui dois componentes principais: o ánodo (elétrodo positivo), disposto na parte superior, e o cátodo ou célula propriamente dita (elétrodo negativo, na parte inferior), onde ocorre a redução do metal, conforme é ilustrado na figura abaixo.



Figura 3 - Fluxograma do processo Hall-Héroult.

Fonte: [Silva, 2020]

As cubas eletrolíticas são fabricadas em chapas de aço revestidas internamente com uma camada de material refratário e carbono (ánodo) e contendo os elétrodos por dentro. O cátodo geralmente é composto de cobre com altíssima pureza, e consiste no polo negativo da célula electrolítica. A passagem da corrente eléctrica do ánodo para o cátodo decompõe a alumina em alumínio e oxigénio, que reage com o carbono do ánodo formando dióxido de carbono, e o metal se deposita no cátodo, sob a forma líquida.

A criolita é adicionada ao banho eletroquímico com o objetivo de abaixar o ponto de fusão da alumina de aproximadamente 2000°C para 1.000°C, através da formação de uma mistura fundida da alumina com criolita ($Al_2O_3 + Na_3AlF_6$). O alumínio formado permanece no estado líquido, pois seu ponto de fusão é inferior ao da mistura de criolita e alumina, isto é, cerca de 660 °C.



2.2. Centro de tratamento de gases

Visando a redução das emissões de gases, no final dos anos 1960 foi desenvolvido o processo de tratamento de gases a seco, que ocorre no CTG – Centro de Tratamento de Gases, onde temos na entrada alumina primária que adsorve o flúor dos gases nocivos e na saída alumina fluorada e gases filtrados, conforme ilustra o diagrama de fluxo da figura abaixo (Silva, 2022).



Figura 4 - Diagrama de fluxo do Centro de Tratamento de Gases.

Fonte: [Autoria própria, 2023]

O Centro de Tratamento de Gases (CTG) é de extrema importância, pois garante o controle de emissões ao ambiente, permitindo a preservação do meio ambiente pela filtração dos gases, que seriam nocivos ao ambiente e teriam impactos extremamente negativos, salvaguardando a saúde dos residentes nas comunidades ao redor e zelando pelo seu bem-estar. Afecta positivamente a economia, permitindo a redução dos custos, pois o flúor é reutilizado. A recirculação permite que este processo seja mais eficaz a medida que a alumina fluorada retorna ao processo após a sua adsorpção e é utilizada para alimentar as células eletrolíticas de redução.

2.2.1. Princípio de funcionamento

O CTG consiste no tratamento dos gases gerados pelo processo de redução electrolítica de alumina, aproveitando as propriedades de adsorpção¹ da alumina, sendo o processo um circuito fechado com aproximadamente 98% de eficiência (Patterson, 2001).

¹ Adsorpção é a adesão de <u>moléculas</u> de um fluido (o adsorvido) a uma superfície sólida (o <u>adsorvente</u>), que depende da <u>temperatura</u>, da <u>pressão</u> e da área da superfície.





Figura 5 - Fluxograma do processo de tratamento de gases a seco.

Fonte: [Autoria própria, 2023]

O processo de tratamento de gases inicia com a entrada dos gases da redução e abastecimento de alumina primária nos silos, que ao ser injectada no reactor do CTG juntamente com os gases, ocorre a adsorpção, resultando na alumina fluorada. Esta passa pelo processo de filtração, onde os gases fluorados são adsorvidos na alumina e os filtrados são expelidos ao meio ambiente e a alumina fluorada é transportada e armazenada no respectivo silo de armazenamento e retorna ao processo e é usada para a alimentação das células electrolíticas da redução.

2.2.2. Circuito de alumina primária

A alumina primária, proveniente do porto é descarregada num ponto de descarga subterrâneo (*pit*) e transportada por um transportador pneumático vertical de alumina primária (*fresh alumina airlift*) a um tanque de expansão (*expansion bin*) provisório e é dirigida à entrada do silo, onde passa pelo processo de colecção de poeiras previamente à sua entrada por um colector de poeiras (*dust colector*). À saída do silo de alumina primária provisório, a alumina é transportada por um segundo transportador pneumático vertical de alumina primária para um segundo tanque de expansão e de seguida dirigido a um transportador vibratório (*vibrating screen*), de modo a garantir a uniformidade da



sua granulometria, permitindo somente as partículas desejadas seguirem ao processo e as indesejadas ao tanque de rejeição (*refuse bin*), onde são armazenadas as partículas volumosas, que podem danificar os equipamentos e o processo. De seguida, a alumina é transportada por um transportador pneumático horizontal de leito fluidizado (*airslide*) a uma caixa de distribuição (*distribution box*), que distribui equitativamente a alumina pelos seus 13 filtros, onde é a posterior injectada no reactor de Venturi.



Figura 6 – Fluxograma do circuito de alumina primária.

Fonte: [Adaptado de MOZAL, 2023]

2.2.3. Circuito de alumina secundária

No processo de filtração dos gases das células electrolíticas, gases fluorinados são extraídos e injectados no reactor de Venturi, onde entram em contacto com a alumina primária e passam pelo processo de adsorpção, resultando na formação de alumina fluorada.

A alumina fluorada é depositada na parte inferior dos filtros, na tremonha (*hopper*), onde é fluidizada e mantida no sistema e a mesma passa pela caixa de junção (*junction box*), que faz a junção da alumina proveniente dos filtros ímpares e dos filtros pares,



previamente ao seu transporte por um transportador pneumático horizontal de leito fluidizado, que se dirige ao transportador pneumático vertical de alumina fluorada. O transportador pneumático vertical de alumina fluorada transporta a alumina ao tanque de expansão por fluidização e de seguida passa pelos transportadores vibratórios de alumina fluorada, que fazem a seleção da alumina desejada e descartam a indesejada, que é depositada nos contentores de rejeição. A alumina desejada é depositada nos silos de alumina fluorada, que também passa pela coleção de poeiras do ar de transporte previamente ao seu armazenamento.



Figura 7- Fluxograma do circuito de alumina secundária.

Fonte: [Adaptado de MOZAL, 2023]



3. COMPRESSÃO DE AR

A compressão de ar consiste na redução do volume, aumentando a sua pressão, sofrendo a mudança de um estado de equilíbrio para o outro, que é chamada de processo, tendo estes estados inicial e final, bem como o seu percurso, como pode é ilustrado na figura abaixo.



Figura 8 - Diagrama de Pressão em função do volume do processo de compressão.

Fonte: [Cengel, 2008]

O ar comprimido é uma energia largamente usada na indústria e para que esta possa ser usada, é preciso fornecer trabalho ao ar para aumentar a sua energia interna, de modo a ser transformada em energia mecânica.



4. SISTEMAS DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO

O transporte pneumático é a mais importante operação industrial de processos de transporte de materiais a granel em ambiente gasoso, que pode ser o ar ou gás.

O transporte pneumático apresenta três componentes necessárias para garantia da quantidade de ar constante e controlável, de forma a obter um fluxo contínuo de ar sob pressão, nomeadamente: o volume de matéria-prima, a velocidade e a pressão do fluido de transporte (Leung, et. al., 2010).

Este transporte é composto por quatro zonas distintas, em que cada uma delas necessita de equipamentos específicos para realizar a sua função. Estas zonas de transporte pneumático são representadas na figura abaixo, nomeadamente: motor primário, alimentação, mistura e aceleração, transporte e separação.



Figura 9 - Zonas de transporte pneumático.

Fonte: [Leung, et. al, 2010]



O sistema motriz é usado para fornecer a energia necessária ao transportador por meio de compressores, sopradores, ventiladores e bombas de vácuo e para que se efective de forma eficiente, deve-se determinar a velocidade do gás, o caudal e a pressão de trabalho (positiva ou negativa).

A zona de alimentação, mistura e aceleração é crucial neste sistema de transporte, pois é onde as partículas são adicionadas ao fluido de transporte. Essencialmente o momento crucial ocorre quando as partículas em repouso são misturadas com o ar ou gás em movimento.

A zona de transporte consiste essencialmente em tubagens selecionadas sob ponto de vista de variados factores, incluído abrasividade do produto, pressão necessária, entre outros e esta procede a zona de aceleração do produto. Esta é constituída também por curvas e válvulas de desvio, pois existe a necessidade de mudança de direção do produto, que consequentemente provoca uma desaceleração do produto e traz a necessidade de introdução de uma zona de aceleração novamente.

A zona de separação gás/sólidos é onde ocorre a separação do produto do fluido de transporte e a seleção do separador gás/sólido adequado é dependente de variados fatores, onde o principal é a dimensão dos sólidos a serem separados do fluido de transporte.

4.1. Fases do transporte pneumático

O transporte pneumático pode ser classificado de variadas formas, mas a característica que mais se adequa ao seu critério de classificação é a concentração gás/sólido no seu sistema de transporte. Sobre este ponto de vista, o transporte pneumático pode ser classificado em duas categorias: transporte pneumático de fase densa e transporte pneumático de fase diluída (Cruz, 2013).

As principais características dos sistemas de transporte pneumático podem ser observadas na tabela abaixo.

Tipo de transporte	X – relação de massa de sólido transportado [kg sólidos/kg de ar]	Vt – velocidade de transporte de sólidos [m/s]	∆p – perda de carga [kPa]
Fase densa	>15	<10	>100
Fase diluída	0-15	>10	<100

Tabela 2 - Características dos sistemas pneumáticos em fases densa e diluída.

Fonte: [Cruz, 2013]

4.1.1. Fase Diluída

Os sistemas de fase diluída, também denominados de fase pobre, geralmente empregam grandes volumes de gás em altas velocidades. A corrente de gás transporta os materiais



como partículas discretas por meio de forças de sustentação e arrasto que atuam nas partículas individuais. Os sistemas de fase diluída constituem os mais amplamente utilizados de todos os sistemas de transporte pneumático (Leung et. al., 2010).

Os sistemas pneumáticos em fase diluída utilizam grande quantidade de gás para remover quantidades relativamente pequenas de material em suspensão a altas velocidades.

Este tipo de transporte utiliza fluxo de gás de alta velocidade para introduzir material na linha de transporte em estado de suspensão como se verifica na figura abaixo (Cruz, 2013).



Figura 10 - Linha de transporte em fase diluída.

Fonte: [Cruz, 2013]

É caracterizado por velocidades de gás maiores que 15 m/s, baixas relações de sólidos e baixas perdas de carga por unidade de comprimento de linha de transporte. É limitado a pequenas extensões, ao transporte contínuo de sólidos a taxas menores do que 8000 kg/h e é o único sistema capaz de operar sob pressão manométrica negativa. Sob condições de fluxo diluído as partículas sólidas comportam-se como individuais, completamente suspensas no gás, e as forças de interação gás/sólido são predominantes (Cruz, 2013).



4.1.2. Fase Densa

Os sistemas de fase densa operam a alta pressão e baixa velocidade de saltitação (em fluxo horizontal), resultando numa distribuição não uniforme de sólidos ao longo da secção transversal do tubo de transporte. O processo de transporte ocorre com uma certa proporção de sólidos que fluem através da porção superior da seção transversal do tubo juntamente com uma corrente de produto altamente concentrada, correspondendo a uma camada móvel expandida. Esta camada móvel avança a uma velocidade menor na parte inferior da seção transversal. Dependendo das características dos sólidos, da velocidade do gás, da taxa de fluxo de sólidos e de fatores como rugosidade do tubo, tamanho do tubo, entre os demais, os padrões de fluxo no modo de fase densa podem variar de instável a estável ou um regime intermediário instável ou estável (Leung et. al., 2010).

O transporte pneumático em fase densa caracteriza-se por transportar sólidos em altas pressões e velocidades muito baixas de 1.5 m/s a 4 m/s e tubagens com alta concentração de sólidos. Este pode ser o método mais favorável e eficiente para a manipulação de uma grande variedade de sólidos secos a granel, quando a integridade de forma do produto é crítica (Cruz, 2013).

A pequena quantidade de ar para movimentar uma grande quantidade de sólidos a granel de forma pulsante, em porções através da linha de transporte, assemelha-o a extrusão. A figura abaixo ilustra o seu sistema (Cruz, 2013).



Figura 11 - Linha de transporte em fase densa.

Fonte: [Cruz, 2013]



O transporte pneumático fase densa, é utilizado geralmente para o transporte de produtos de alta e média densidade, sensíveis ao calor, semi-abrasivos e produtos muito frágeis.

A figura abaixo mostra a transição suave da fase densa para a fase diluída, verificandose que ao reduzir a velocidade do ar da máxima para mínima e mantendo-se o caudal mássico do produto constante, a queda de pressão também diminui, atingindo um valor mínimo. À direita deste ponto mínimo de pressão verifica-se a fase diluída. Entretanto, se a velocidade de ar continuar a diminuir, a queda de pressão aumenta para uma taxa mais alta do que a da fase diluída, esta região é denominada de fase densa. Verifica-se também que, para a mesma velocidade, quanto maior o caudal de sólidos (G) maior a queda de pressão (Cruz, 2013).



Figura 12 - Mudança de fase diluída para a fase densa.

Fonte: [Cruz, 2013]

Onde:

v - é a velocidade do ar [m/s]

G - é o caudal de sólidos [kg/s]


4.2. Regimes de escoamento

Os padrões das fases de escoamento podem variar bruscamente, podendo colmatar a secção da tubagem, ocasionando um escoamento denso ou gerando escoamentos nos quais os sólidos no fundo da conduta movem-se como uma série de dunas e com uma camada de fase diluída a mover-se sobre elas. As situações de escoamentos estáveis resultam num processo de escoamento suave, enquanto as situações instáveis são caracterizadas por violentos aumentos de pressão conforme a camada móvel se quebra. Dentro de cada tipo de fase, diluída ou densa, podem se verificar vários tipos de regimes de escoamento.



Figura 13 - Características gerais do transporte pneumático para fase diluída, zona instável e fluxo em golpes de golfadas.

Fonte: [Cruz, 2013]

A figura acima apresenta as características gerais do transporte pneumático para fase diluída, zona instável e fluxo intermitente. O ponto 1 representa a distribuição das partículas em fase diluída na secção transversal da conduta. O ponto 2 indica o ponto de pressão mínima e a formação de uma camada de partículas na parte inferior da tubagem devido a redução do caudal mássico de ar. Como o caudal mássico de ar baixa, algumas partículas tornam-se estacionárias ao longo da parte inferior da tubagem e outras são transportadas em pequenas dunas e agrupamentos. Ao diminuir ainda mais o caudal mássico de ar, a velocidade de ar torna-se insuficiente para manter em suspensão as partículas verificando-se então a acumulação de algumas partículas na parte inferior da tubulação e a formação de golfadas longas. Estas golfadas longas são forçadas a



atravessar a tubagem e produzem flutuações altas de pressão e vibração, formando uma zona instável (ponto 3). No ponto 4 observa-se que ao se reduzir ainda mais a velocidade do ar, o transporte das partículas apresenta-se na forma intermitente. Ao longo da tubagem horizontal os *slugs* (golfadas) levantam as partículas da camada da frente e depositam a mesma quantidade de partículas atrás delas (Cruz, 2013).



Figura 14 - Características da fase diluída.



Pela Figura acima observam-se as características da fase diluída. Quando o caudal mássico de ar diminui do mais alto para o mais baixo e para um caudal mássico de produto estando constante, a queda de pressão também diminui. Antes de alcançar a curva mínima de pressão (PMC), as partículas começam a saltar e acumulam-se rapidamente ao longo da parte inferior da tubagem. O bloqueio ocorre logo que o material preenche completamente uma secção da conduta (Cruz, 2013).

4.2.1. Velocidade para o transporte em fase diluída

A velocidade de gás é um fator crítico e determinante num projecto de transporte pneumático. Se esta for muito baixa pode provocar obstruções na tubagem e se for muito alta pode aumentar a perda de carga, o desgaste na linha, principalmente em curvas, e reduzir o caudal mássico de material a ser transportado.

A determinação da velocidade mínima de transporte depende das propriedades físicas do material. A velocidade superficial do gás, v_{g} , é baseada na área da secção transversal



da tubagem vazia, mas pode ser obtida utilizando, um Tubo de *Pitot* para a mistura gás/sólido, conforme a equação.

$$v_g = \frac{Q_g}{A} = \frac{W_g}{A \times \rho_g} \left[\frac{m}{s}\right] \tag{2}$$

Onde:

 v_q - Velocidade superficial do gás;

 ρ_{g} - Densidade go gás;

A velocidade de um transporte não pode ser excessiva, por razões de consumo de potência, diminuição do desgaste abrasivo das tubagens (especialmente em cotovelos) e para alguns casos, de forma a diminuir a deterioração das partículas causada por impactos.

A velocidade de transporte ainda pode ser calculada usando a expressão adaptada por (Gomide, 1983):

$$v = v_f \times v_t \left[\frac{m}{s}\right] \tag{3}$$

$$v = \left(4.11 \times \sqrt[3]{\rho_p} \times \sqrt{d_p}\right) + \left(23.4 \times \sqrt{\rho_p}\right) \left[\frac{m}{s}\right]$$
(4)

Onde:

vf - Velocidade de flutuação do fluido em condutas verticais e horizontais [m/s];

vt - Velocidade de transporte dos sólidos [m/s];

 ρ_p - Densidade das partículas [t/m³];

d_p- Diâmetro das partículas [mm].

4.5.2. Velocidade de afogamento no transporte vertical

De acordo com Molodtsof & Motte, 2001, a velocidade de gás mínima de transporte pneumático vertical, pode ser definida como a necessária para transportar em fase diluída, os sólidos em suspensão. A velocidade de afogamento é utilizada para marcar o limite entre a fase diluída e a fase densa em tubos verticais.

A figura abaixo apresenta o diagrama de fase para transporte vertical de fase diluída, relacionando o gradiente de pressão por unidade de comprimento ($\Delta P / \Delta L$) e a velocidade do gás.



Figura 15 - Diagrama de fase para transporte vertical de fase diluída, mostrando a relação geral entre gradiente de pressão $\Delta P / \Delta L$ e a velocidade do gás.

Fonte: [Cruz, 2013]

A curva **AB** representa a perda de pressão por atrito devido ao escoamento do gás no transporte vertical com um caudal mássico nulo. A curva **CDE** é para um fluxo de sólidos com um caudal mássico, G₁. A curva **FG** é para um caudal mássico mais alto, G₂.

No ponto **C** a velocidade do gás é alta, a concentração é baixa e a resistência do atrito entre o gás e a parede do tubo é predominante. A medida que a velocidade do gás é reduzida, a resistência do atrito diminui, mas como a concentração da suspensão aumenta, a carga estática exigida para suportar estes sólidos aumenta. Se a velocidade do gás é reduzida a um valor abaixo do ponto **D**, então o aumento na carga estática excede em valor a diminuição na resistência por atrito, e sobe novamente.

Na região **DE** a velocidade decrescente causa um aumento rápido na concentração de sólidos e é alcançado um ponto em que o gás não pode mais arrastar todos os sólidos. Neste ponto, forma-se na linha de transporte um leito fluidizado deslizante (*slugging*). O fenómeno de afogamento é normalmente acompanhado por grandes flutuações de pressão.

A velocidade de afogamento, v_{ch} é definida como a velocidade mais baixa na qual essa linha de transporte pode operar em fase diluída com o caudal mássico de alimentação de sólidos G₁. Com um caudal mássico de alimentação de sólidos mais alta, G₂, a velocidade de afogamento é mais alta. Esta velocidade marca o limite entre transporte pneumático vertical de fase diluída e o transporte de fase densa. É de notar que o afogamento pode ser alcançado diminuindo a velocidade do gás com um caudal mássico de sólidos constante, ou aumentando o caudal de sólidos com uma velocidade do gás constante.



5. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO TRANSPORTE DE ALUMINA FLUORADA

O sistema de transporte pneumático de alumina fluorada do CTG é feito através do ar comprimido e especificamente para o transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada recorre-se ao compressor de lóbulos, que é responsável pelo fornecimento do fluido de transporte (ar comprimido) e este é transportado por fluidização. O transportador contém um tecido de fluidização e um bocal que são determinantes na sua eficiência, pois dão a aceleração necessária à alumina e permitem que a quantidade necessária seja transportada, de acordo com a dosagem de material e pressão de ar comprimido fornecida pelo compressor.

5.1. Eficiência do compressor de lóbulos (roots)

$$W_{real} = -\int v dP \tag{5}$$

$$W_{real} = v_1(P_1 - P_2)$$
(6)

$$W_{isentropico} < W_{real} \tag{7}$$

$$W_{isentropico} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1 v_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma}} - 1 \right]$$
(6)





Fonte: [https://learnmech.com, 23/11/2023, 4:45]



A eficiência do compressor de lóbulos será calculada da seguinte forma:

 $\eta_{compressor \ de \ lobulos} = \frac{W_{isentrópico}}{W_{real}} \tag{9}$

Onde:

 $\eta_{\rm compressor \, de \, l \acute{o} bulos}$ – eficiência do compressor de lóbulos

Wisentrópico - trabalho de compressão isentrópico

Wreal-trabalho de compressão real



Figura 17 - Diagrama de compressão do compressor de lóbulos.

Fonte: [https://learnmech.com, 23/11/2023, 4:47]

5.2. Eficiência energética

Para que se analise a eficiência energética do sistema serão analisadas as perdas hidráulicas e resistências hidráulicas que podem aumentar o consumo de energia.

A equação da energia pode ser escrita da seguinte forma:

$$\left(\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2\right) - \left(\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1\right) = \frac{W_m}{\gamma Q} - perdas$$
(10)

Primeiramente, serão analisadas as perdas de carga, que podem ser de dois tipos:

 Perda de carga distribuída causada pelo atrito viscoso ao longo dos trechos rectos da conduta;



• Perda de carga singular (ou localizada) em elementos da instalação como cotovelos, mudanças de área de secção, válvulas, entre outros.



Figura 18 – Perfil de velocidades em tubagem regular.

Fonte: [https://edisciplinas.usp.br, 23/11/2023, 05:04]

Os gradientes de velocidade do perfil desenvolvido nos trechos rectos da conduta causam o aparecimento de tensões viscosas que provocam dissipação de energia mecânica na forma de calor, enquanto nas singularidades causam o aparecimento de regiões de recirculação localizadas com altos gradientes de velocidade relacionados com as inversões de perfil de velocidade. Esse efeito também pode causar a dissipação de calor por atrito viscoso.

Perda de carga distribuída

A perda de carga pode ser calculada pela equação de Darcy-Weisbach, representada da seguinte forma:

$$h_f = f \frac{L}{D_H} \frac{V^2}{2g} \tag{11}$$

Onde:

L – é o comprimento do trecho recto

 D_{H} – é o diâmetro hidráulico usado de forma generalizada para condutas de secção arbitrária

 $f - \acute{e}$ o coeficiente de atrito de Darcy

O coeficiente de atrito ou perda de carga distribuída é dado por:



$$f = f\left(Re, \frac{\varepsilon}{D_H}\right) \tag{12}$$

Onde o número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{\rho V D_H}{\mu} = \frac{V D_H}{\nu} \tag{13}$$

E ε é a rugosidade da parede interna da conduta.

O cálculo do coeficiente de atrito depende do tipo de escoamento: teremos escoamento laminar se Re<2000 e escoamento turbulento se Re>2400. Entre este intervalo encontrase o regime transitório.

$$f = \frac{64}{Re} \text{ para Re} < 2000 \tag{14}$$

$$f \frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log 10 \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D_H}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$
 para Re>2400 (15)

O diagrama de Moody também pode ser usado para calcular f.

Para a detecção de fugas no sistema, foi usado o método ultrassónico, recorrendo ao detector de fugas ultrassónico, que consiste na emissão de ruídos ultrassónicos gerados pela detecção de fugas em sistemas pressurizados, neste caso, numa linha de ar comprimido.

A detecção foi feita no compressor e no transportador, de modo a aferir a quantidade de ar comprimido perdida por fugas e verificar se compromete a quantidade que deve chegar ao transportador para o transporte de material.





Figura 45 - Detector de fugas ultrassónico. Fonte: [https://www.cs-instruments.com/, 23/11/2023, 04:52]



Figura 19 - Detecção de fugas no compressor. Fonte: [Autoria própria, 2023]





Figura 20 - Detecção de fugas no transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada.

Fonte: [Autoria própria, 2023]

5.3. Eficiência do transportador pneumático vertical ascendente

A eficiência do transportador pneumático ascendente depende especialmente do desempenho dos seus componentes principais. Para avaliar a eficiência do seu transporte podem ser calculadas as pressões:

1. Pressão devido a aceleração

$$\Delta p_1 = 0.5 \rho_{ALF_3} v^2 \tag{16}$$

2. Pressão devido ao peso

$$\Delta p_2 = \rho_{ALF_3} gh \tag{17}$$

3. Pressão devido a velocidade

$$\Delta p_3 = 0.5\lambda \rho_{ALF_3} v^2 \tag{18}$$

4. Pressão total

$$p = \Sigma \Delta p \tag{19}$$



Onde:

 ρ_{ALF_3} – densidade da alumina fluorada

- λ coeficiente linear de perdas de pressão por atrito em tubos
- v velocidade do ar [m/s]
- h altura do transportador

O coeficiente linear de perdas de pressão por atrito para o transportador em estudo é 0.015 e pode ser calculado da seguinte forma:





Fonte: [MOZAL, 2023]

Conforme a figura ilustra, o transportador pneumático vertical ascendente contém um bocal que desempenha um papel de extrema importância, pois garante a aceleração no transporte do material, neste caso, alumina fluorada. O tecido de fluidização é responsável pela fluidização do material, garantido que este não fique bloqueado e o material seja transportado.

$$\lambda = \frac{1}{(1.8\log Re - 1.64)^2}$$
(20)







Fonte: [Nitz & Guardini, 2009]

O regime seguinte ao turbulento é o de fluidização rápida, que acontece quando a velocidade do ar excede a velocidade terminal de sedimentação das partículas e o material passa a ser arrastado. Com velocidades ainda maiores, suficientes para arrastar todo o material, atinge-se a condição de transporte pneumático, conforme verifica-se no transportador em causa (Nitz & Guardini, 2009).



6. PROCESSAMENTO DE DADOS

6.1. Apresentação dos Dados

A recolha de dados seguiu a seguinte sequência: CTG 3, CTG 4, CTG 1 e por último o CTG 2, cuja escolha foi feita consoante os dados do *Trend*, pois é através do aplicativo mencionado que são monitorados os parâmetros de funcionamento dos equipamentos.





Fonte: [Autoria própria, 2023]

O gráfico de pressões acima apresentado ilustra o seu comportamento em cada CTG, onde temos:

- Pressão de Compressor esta ilustra a pressão imprimida pelo compressor.
- Pressão de Fluidização esta ilustra a pressão de fluidização da alumina fluorada no transportador.
- Pressão de Transporte esta ilustra a pressão de transporte da alumina fluorada no transportador.



A combinação destas três pressões é de extrema importância para a garantia do transporte do material, pois permitem controlar e monitorar a quantidade de ar comprimido no sistema e assegurar que os parâmetros permanecem dentro do padrão.

As pressões de fluidização e de transporte devem ser diretamente proporcionais à pressão do compressor, pois este é que dá a pressão ao sistema, na sua descarga.

Conforme ilustra o gráfico, há uma variação da pressão de fluidização na presença e na ausência do ar comprimido adicional. Este é adicionado para aumentar a pressão de fluidização, colocado na base do transportador, inserido de forma a impactar o tecido de fluidização, permitindo o movimento do material de forma a evacuá-lo e transportá-lo. Esta variação de pressão teve mais impacto no CTG número 2, conforme pode ser verificado no gráfico, menor impacto no CTG 3 e um impacto também significativo nos CTGs número 1 e número 4, embora não na mesma magnitude. A seguir são ilustrados detalhadamente os gráficos de pressão e de fluxo dos CTGs.



Gráfico 2 - Pressões do Transportador no CTG 2.

Fonte: [Autoria própria, 2023]

Conforme ilustra o gráfico de pressões, há uma grande variação da pressão de fluidização após a remoção do ar comprimido adicional, o que mostra a sua instabilidade,



cujo cenário fora revertido após intervenção e mantido a sua estabilidade, embora a pressões demasiado baixas.



Gráfico 3 – Gráfico de Pressão em função do fluxo volumétrico no transportador do CTG 2.

Fonte: [Autoria própria, 2023]

Este CTG demonstra haver proporcionalidade nos seus dados, pois o seu fluxo volumétrico de ar comprimido é proporcional a pressão de descarga imprimida pelo compressor, embora com muita dificuldade registou melhorias após intervenção e não tendo atingido os valores desejados. A possibilidade de funcionamento do transportador sem a adição de ar comprimido foi comprovada após melhorias realizadas no sistema.





Experiência de taxa de alimentação máxima de alumina fresca





Fonte: [Adaptado do aplicativo informático Trend, 2023]

Figura 24 – Ilustração da taxa de ocupação do material no transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada aquando da experiência.



Durante a experiência realizada, com o objetivo de testar a capacidade máxima de transporte dos transportadores pneumáticos verticais de alumina fluorada, foi inserida alumina fresca ao sistema de alumina primária.

Houve necessidade de redução da alimentação por 3 horas de tempo para o seu aumento de forma gradual, até as 39 toneladas/hora, que corresponde a sua capacidade de alimentação máxima, o que provocou saturação nos filtros de mangas e ar comprimido teve de ser adicionado, de forma a permitir que o material fosse transportado, permitindo também aliviar a caixa de junção, pois estava sobrecarregada. Esta experiência mostrou a importância de manter-se a pressão desejada no sistema para garantir os resultados desejados, pois se a pressão desejada tivesse sido atingida o transportador conseguiria suprir a demanda por mais de 3 horas, que foi o atingido nesta experiência, o que comprova que o transportador é capaz de operar na sua capacidade máxima.

Experiência nos compressores do CTG 2



Figura 25 - Gráfico de funcionamento do transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada do CTG 2 com o compressor de lóbulos 001 em funcionamento.

Fonte: [Adaptado do aplicativo informático Trend, 2023]





Figura 26 - Gráfico de funcionamento do transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada do CTG 2 com o compressor de lóbulos 002 em funcionamento.



A experiência nos compressores, realizada a 5 de Setembro, na ausência de ar comprimido mostrou que estes compressores mantiveram a sua performance por 11 horas e 3 horas de tempo, respectivamente e a posterior o sistema ficou sobrecarregado devido a quantidade de material que bloqueou o sistema e impediu de ser transportado devido à pressão insuficiente de descarga por sua parte, havendo a necessidade de adição de ar comprimido para garantir o seu transporte. Isto mostra que o compressor 001 apresenta melhor performance, em relação ao compressor 002.



6.2. Análise e discussão dos resultados

Pressão x Fluxo volumétrico do transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada

Pressão do Compressor [kPa]	Fluxo volumétrico [m³/min]
21.23	33.89
33.97	38.33

Tabela 3 – Valores máximos e mínimos de pressão e fluxo volumétrico.



Fonte: [Autoria própria, 2023]

Figura 27 - Curva do compressor de lóbulos do transportador pneumático vertical.

Fonte: [MOZAL, 2023]

Para a determinação da curva do compressor foram consultadas a potência e o número de rotações do compressor juntamente com o fluxo, antes e depois da implementação da tecnologia AP3XLE.



<u>Comparação dos parâmetros de funcionamento do sistema antes e depois da</u> <u>implementação da tecnologia AP3XLE</u>

Descrição	Unidade		Parâmetros		
				Origem	AP3X LE
Corrente				320 kA	378 kA
Transportador pneumático vertical de alumina fluorada	Fluxo nominal por CTG			29 ton/h	34 ton/h
	Fluxo máximo por CTG			34 ton/h	39 ton/h
Pressão do compressor do transportador de alumina	Pressão CTG	nominal	por	27 kPa	30 kPa
nuorada	Pressão CTG	máxima	por	41 kPa	50 kPa
Fluxo volumétrico de ar comprimido	Fluxo nominal	volumét	rico	49 m ³ /min	53 m³/min
Taxa de alimentação de alumina primária	Mínima			26 ton/h	29 ton/h
	Máxima			32 ton/h	34 ton/h

Tabela 4 - Parâmetros dos equipamentos no antes e depois da implementação da tecnologia AP3XLE.

Fonte: [Autoria própria, 2023]

Sendo os seus valores padrão: $P_{comp} = 30$ kPa a 50kPa e Q= 49 m³/min a 53 m³/min, iliustrados na figura 54, da curva do compressor. O CTG 2 demostra estabilidade pelos valores de pressão e fluxo volumétrico aferidos, de acordo com a taxa de alimentação de alumina primaria, atendendo e considerando o facto de não haver nenhum alarme de pressão alta acompanhado da paragem do equipamento, que indicaria que o transportador não consegue ultrapassar a resistência ao longo da conduta ao ponto de ser incapaz de transportar a alumina fluorada.

A detecção das fugas pelo método ultrassónico foi feita com sucesso e pode se afirmar que a quantidade é aceitável, totalizando 242.8 l/min, sendo 185 l/min no compressor e 57.7 l/min no transportador, que representam quantidades insignificantes. Este facto



combinado a quantidade também considerável de *scale*² de alumina fluorada colectado na limpeza do transportador confirma que este não constituía um fator negativo à sua performance.

O tecido de fluidização é determinante na performance do transportador, pois este condiciona o transporte da alumina e a sua porosidade define a quantidade de alumina que é permitida ser transportada, combinada a quantidade de ar comprimido que é descarregada pelo compressor, passando pela placa de orifício a montante da válvula de retenção.

O conjunto de acionamento do compressor tem uma relação de transmissão relativamente baixa, comparada aos parâmetros de funcionamento, estando entre 129 RPM e 154 RPM abaixo do recomendado, isto é, para a polia movida que corresponde a polia do compressor de lóbulos, podendo ter melhor desempenho pelo uso de polias apropriadas.

O transportador pneumático de alumina fluorada do CTG 2, pelos dados apurados apresenta em média uma **eficiência de 64.87%** e apresentado um decréscimo de 3.96% de consumo de ar comprimido, o que corresponde a uma economia de energia em **157960.0721 kWh**, equivalente a **1,333,183.01 MZN** mensalmente, mostrando que este transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada é eficiente e a implementação da tecnologia AP3XLE é funcional.

² *Scale* é o nome usado para designar o acúmulo de material, formando pedras de diversos tamanhos, que podem criar bloqueio e danificar a produção e o equipamento.



7. VIABILIDADE ECONÓMICA DO PROJECTO

Salas de células eletrolíticas	СТС	Data	Fluxo volumétrico [m ³ /h]	Consumo de potência [kW]	Consumo de energia [kWh]	Consumo mensal [MZN]
		Antes d	a remoção do	Ar Comprimido)	
Sala de célula eletrolítica B	CTG 2	07/28 - 08/29	9092.004545	5594.584909	4028101.134	33,997,173.58
		Depois o	da remoção do	Ar Comprimide	0	
Sala de célula eletrolítica B	CTG 2	08/30 - 09/30	9004.296364	5375.19592	3870141.062	32,663,990.57

Avaliação económica comparativa de consumo de ar comprimido

Tabela 5 - Avaliação económica comparativa de consumo de ar comprimido.

Fonte: [Autoria própria, 2023]

Sendo que 1kWh = 8.44 MZN.

Conforme ilustra a tabela, houve um decréscimo significativo de consumo de energia, derivado do decréscimo do uso do ar comprimido, contribuindo assim para a economia e racionalização dos recursos. No CTG em estudo, número 2, houve alguma dificuldade para apuração mais precisa dos dados, devido a necessidade de recolocação para melhor fluidização e à sobrecarga nos seus filtros de mangas e dificuldade de transporte antes de intervenção.

Estimativa de consumo anual

Salas de células eletrolíticas	CTG	Consumo de potência annual [kW]	Consumo de energia anual [kWh]	Consumo anual [MZN]
Sala de célula eletrolítica B	CTG 2	67135.01891	48337213.61	407,966,082.90
Sala de célula eletrolítica B	CTG 2	64502.35104	46441692.75	391,967,886.80

Tabela 6 – Estimativa de consumo anual

Fonte: [Autoria própria, 2023]

Com os dados apurados, é possível afirmar que com a remoção do ar comprimido adicional, devolvendo ao transportador a sua eficiência operacional, contribuindo para uma economia de **1895520.865 kWh**, correspondentes a **15,998,196.10 MZN** anualmente.



8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1. Conclusões

- As medições feitas, na presença e na ausência de ar comprimido, mostram haver um decréscimo da sua pressão, especialmente da pressão de fluidização da alumina fluorada no transportador pneumático vertical ascendente, pois esta adição afecta diretamente e impacta o tecido de fluidização.
- Pelos ensaios ultra-sônicos feitos para aferir as perdas de ar comprimido, combinadas as medições das pressões feitas diretamente no compressor e no transportador, foi possível constatar que as quedas de pressão ocorrem devido às mudanças de direção ao longo da conduta, acompanhado das fugas no seu percurso, contribuindo para uma perda de 242.8 l/min de ar comprimido.
- Através dos valores aferidos de pressão e fluxo, foi possível determinar a curva do compressor de lóbulos do transportador vertical ascendente de alumina fluorada, estando este dentro dos parâmetros.
- A certificação de que toda a cadeia de manuseio do sistema de recirculação de alumina esteja sob pressão negativa é de extrema importância.
- No computo geral, o compressor e o transportador operam a valores aceitáveis, tendo apresentado resultados bastante satisfatórios, pois o estudo demonstra haver melhoria da pressão do compressor e de transporte, afectadas pela pressão de fluidização, cujos factores determinantes para que este facto se verificasse podem ser listados: a limpeza do transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada, a troca do tecido de fluidização do transportador, a troca de transmissão das polias do compressor e a troca do bocal do transportador, que é determinante na sua velocidade de transporte. Estes factores combinados trouxeram melhoria no sistema de transporte pneumático de alumina fluorada, garantindo a durabilidade dos seus equipamentos e manutibilidade do mesmo, além de contribuir para a economia de ar comprimido, e consequentemente, de energia, comprovando as descrições padrão de funcionamento do mesmo.



8.2. Recomendações

Este estudo trouxe grandes subsídios à indústria de produção de alumínio, especialmente ao Centro de Tratamento de Gases e como forma de aprimorar este estudo, eis as seguintes sugestões:

- Criação de estratégia de manutenção para os tecidos de fluidização dos transportadores pneumáticos verticais, de modo a melhor controlar a sua qualidade e assegurar a fluidização da alumina fluorada e o seu transporte, pois ao longo do tempo este vai criando humidade e bloqueio nos seus poros;
- Padronização dos compressores, polias e correias usadas, de modo a garantir maior controle e monitoria de forma mais estável.
- Uso de polias com menos peso, ocas, em detrimento das polias maciças em uso corrente, pois contribuem para que haja vazamento de óleo no eixo de transmissão do compressor, provocando um elevado nível de vibrações pelo esforço excessivo que estas imprimem, consequentemente, contribuindo para o seu baixo desempenho.
- Implementação de um plano de detecção e quantificação das fugas de ar comprimido para melhor aferir os seus pontos e resolução dos mesmos de forma imediata e mais precisa.



9. **BIBLIOGRAFIA**

- 1. AARHAUG, T., & RATVIK, A. (2019). Aluminium Primary Production Off-Gas Composition and Emissions: An Overview (Vol. 71). JOM.
- 2. CARDOSO, J., CARVALHO, P., FONSECA, P., SILVA, M., & ROCIO, M. (2014). *A industria do aluminio: estrutura e tendencias.* Brasil: BNDES.
- 3. CASAVECHIA, L. C. (1993). Estudo da Fluidodinamica e da Troca Termica Gas-Solidos no Transporte Pnaumatico Vertical Ascendente de Misturas de Particulas Solidas. Campinas: FEDC.
- 4. CASTEL-BRANCO, N. C. (2010). *Economia Extrativa e Desafios de Industrializacao em Mocambique.* Maputo: IESE.
- 5. CENGEL, Y., & BOLES, M. (2000). Termodinamica (Vol. 5th). McGraw-Hill.
- 6. CENGEL, Y., & CIMBALA, J. (2008). *Mecanica dos Fluidos.* Santa Fe, Mexico: McGraw-Hill.
- 7. COPCO, A. (2015). *Compressed Air Manual* (Vol. 8th). Belgium: ATLAS COPCO Airpower NV.
- 8. CRUZ, F. D. (2013). *Transporte Pneumatico de Granulados em Fase Diluida.* Coimbra: ISEC.
- 9. Dias, S. C., & DIAS, J. A. (2019). Quimica Inorganica Basica O Aluminio.
- 10.Diego. (n.d.). *Transportadores Continuos para Graneis SolidosTransporte Pneumatico.*
- 11.FERRAZ, C. F. (2017). Desenvolvimento de uma metodologia para estimativa de reducao dos custos com a geracao de ar comprimido. Guaratingueta: UNESP.
- 12. FERRAZ, F. (2010). Compressores. Bahia: IFECE.
- 13. FERREIRA, M. (2023). Analise da Eficiencia Energetica em Central de Ar Comprimido. Recife: UFPE.
- 14. FONSECA, A. C. (2018). *Recursos Minerais de Minas Gerais Aluminio.* Minas Gerais, Brasil: UFMG-IGC.
- 15. FRIEDRICH, B., & JARONI, B. (2011). Carbothermic Reduction of Alumina: A Review of Developed Processes and Novel Concepts. Zurich, Switzerland.
- 16. Gomes, L. M. (2011). Contribuicao aa Analise do Transporte Pneumatico em Fase Diluida. Belem: PRODERNA.
- 17. GOMIDE, R. (1983). Operacoes Unitarias. Sao Paulo.



- 18. KOVACS, L., & VARADI, S. (1998). Budapest: Technical University of Budapest.
- 19. KOVACS, L., & VARADI, S. (1999). *Two-Phase Flow in the Vertical Pipeline of Airlift* (Vol. 43). Budapest: Technical University of Budapest.
- 20. KVANDE, H., & DRABLOS, A. (2014). *The Aluminium Smelting Process and Innovative Alternative Technologies* (Vol. 56). United States of America: JOEM.
- 21. LEUNG, L., & JONES, P. (2010). *Proceedings of Pneumotransport 4.* Cranfield: BHRA Fluid Engineering.
- 22. LEUVEN, G., HENNEBERGER, S., & LATHAM, C. (2010). Estudo tecnico e experimental sobre a eficiencia energetica de sopradores de parafusos comparados aos sopradores rotativos de lobulos. Belgica.
- 23.LOPES, C. S. (2011). Estudo da Alimentacao de Solidos em Sistemas de Transporte Pneumatico. Sao Carlos: UFSC.
- 24. LORENA, S. (2022). Metalurgia extrativa do aluminio.
- 25. MARQUES, F. V. (2013). *Alumina in Aproducao de aluminio no Brasil.* Rio de Janeiro, Brasil: UFRJ.
- 26. MARTIRES, R. A. (2010). Aluminio. Brasil.
- 27. MASSARA, V. M. (2004). Producao de aluminio do ponto de vista do consumo de energia. Sao Paulo, Brasil.
- 28. MOLODTSOF, Y., & MOTTE, J. (2001). *Predicting transpot velocities.* Powder technology.
- 29. MONTEIRO, R. N. (2006). Estudo do Transporte Pneumatico Vertical de Rolhas de Cortica.
- 30. MORAES, C. V. (2011). Materiais para Engenharia Aluminio e suas ligas.
- 31. MOURA, F. E. (2001). Avaliacao do sistema de alimentacao de alumina no processo Hall-Heroult na Alumar. Paraiba, Campina Grande, Brasil.
- 32. NITZ, M., & GUARDANI, R. (2009). *Fluidizacao Gas-Solido Fundamentos e Avancos.* Brasil.
- 33. PABLO, I. (2009). O aluminio. Rio de Janeiro, Brasil: PUC.
- 34. PATTERSON, E. C. (2001). Fluoride Emissions from Aluminium Electrolysis Cells. Auckland, New Zeland: UA.
- 35. ROBUSCHI. (2016). Operating and Maintenance Instructions for Blowers. Canada: ROBUSCHI.



- 36. ROGER, J. W. (2009). Vertical Dense-Phase Pneumatic Conveying from a *Fluidized Bed.* United States: ProQuest.
- 37. SAMAPAIO, J., ANDRADE, M., & DUTRA, A. (2012). Processo de producai de alumina in Bauxita.
- 38. SILVA, K. K. (2022). Modificacao das propriedades da alumina SGA em decorrencia do processo de tratamento de gases a seco. Santa Catarina, Brasil: UFSC.
- 39. STEPHEN, L. J. (2011). Attrition of Alumina in Smelter Handling and Scrubbing Systems. Tennessee: TMS.
- 40. VASCONCELOS, P. D. (2011). *Transporte Pneumatico Fluidizado Estudos Aplicados aa Industria do Aluminio Primario.* Belem: PRODERNA.
- 41. WILLIAMS, E. (2016). Light Metals. Brisbane, Australia: Springer.

Anexos

ANEXO 1 – MOZAL



Figura A1.1: MOZAL.

Fonte: [MOZAL, 2023]



Figura A1.2: Centro de Tratamento de Gases.

Fonte: [MOZAL, 2023]



Figura A.1.3: Layout do CTG.

Fonte: [MOZAL, 2023]

ANEXO 2 - Cálculos auxiliares e dados de entrada

Date	Pressão de Fluidização	Pressão de Transporte	Pressão do Compressor
8/14/2023	63.09	28.14	24.44
8/29/2023	11.90	24.89	26.98
9/4/2023	48.38	25.92	25.03
9/11/2023	15.56	11.98	27.30
9/14/2023	40.72	28.09	28.25
9/18/2023	18.06	33.03	33.97
9/19/2023	12.06	22.46	22.61
9/21/2023	12.27	22.85	23.00
9/22/2023	12.61	23.49	23.65
9/26/2023	11.83	22.03	22.18
9/27/2023	12.93	24.08	24.25
9/28/2023	11.32	21.08	21.23
9/29/2023	11.82	22.02	22.17
10/2/2023	12.17	22.67	22.82
10/3/2023	12.48	23.24	23.39
10/4/2023	13.23	24.64	24.80
10/5/2023	12.36	23.01	23.16
10/6/2023	12.33	22.96	23.11
10/9/2023	12.39	23.08	23.23
10/10/2023	12.18	22.68	22.83
10/11/2023	12.23	22.77	22.93

Tabela de pressões do CTG 2

Tabela A.2.1: Pressões medidas no CTG 2.

Tabela de dados de entrada do fluxo volumétrico do CTG 2
--

Date	Pressão dinâmica [Pa]	Pressão estática [Pa]	Temperatura [ºC]	Temperatura [K]	Diâmetro externo [mm]	Diâmetro interno [mm]
8/14/2023	172.15	32.45	30.50	303.50	219.3	206.7
8/29/2023	190.03	35.82	31.33	304.33	219.3	206.7
9/4/2023	176.33	33.23	30.50	303.50	219.3	206.7
9/11/2023	192.30	36.24	31.70	304.70	219.3	206.7
9/14/2023	198.10	29.53	50.20	323.20	219.3	206.7
9/18/2023	170.60	34.05	32.80	305.80	219.3	206.7
9/19/2023	193.60	23.76	49.60	322.60	219.3	206.7
9/21/2023	172.52	21.17	44.33	317.33	219.3	206.7
9/22/2023	177.41	21.77	45.60	318.60	219.3	206.7
9/26/2023	166.41	20.42	42.77	315.77	219.3	206.7
9/27/2023	182.03	22.32	46.78	319.78	219.3	206.7
9/28/2023	159.36	19.54	40.95	313.95	219.3	206.7
9/29/2023	166.46	20.41	42.77	315.77	219.3	206.7
10/2/2023	171.35	21.01	44.03	317.03	219.3	206.7
10/3/2023	175.59	21.53	45.12	318.12	219.3	206.7
10/4/2023	186.19	22.83	47.84	320.84	219.3	206.7
10/5/2023	173.88	21.32	44.68	317.68	219.3	206.7
10/6/2023	173.47	21.27	44.57	317.57	219.3	206.7
10/9/2023	174.45	21.39	44.83	317.83	219.3	206.7
10/10/2023	171.43	21.02	44.05	317.05	219.3	206.7
10/11/2023	172.16	21.11	44.24	317.24	219.3	206.7

Tabela A.2.2: Dados de entrada para o cálculo do fluxo volumétrico do CTG 2.

Date	Velocidade [m/s]	Area [m²]	Densidade do ar comprimido [kg/m ³]	Fluxo normal [m³/min]	Fluxo real [m³/min]
8/14/2023	17.21	0.03	1.16	31.16	34.63
8/29/2023	18.10	0.03	1.16	32.69	36.43
9/4/2023	17.42	0.03	1.16	31.53	35.05
9/11/2023	18.22	0.03	1.16	32.87	36.67
9/14/2023	19.05	0.03	1.09	32.39	38.33
9/18/2023	17.20	0.03	1.15	30.90	34.60
9/19/2023	18.81	0.03	1.09	32.05	37.86
9/21/2023	17.62	0.03	1.11	30.50	35.45
9/22/2023	17.90	0.03	1.11	30.87	36.02
9/26/2023	17.26	0.03	1.12	30.03	34.73
9/27/2023	18.16	0.03	1.10	31.21	36.55
9/28/2023	16.84	0.03	1.12	29.47	33.89
9/29/2023	17.26	0.03	1.12	30.04	34.74
10/2/2023	17.55	0.03	1.11	30.41	35.31
10/3/2023	17.79	0.03	1.11	30.74	35.81
10/4/2023	18.40	0.03	1.10	31.51	37.03
10/5/2023	17.69	0.03	1.11	30.61	35.61
10/6/2023	17.67	0.03	1.11	30.58	35.56
10/9/2023	17.73	0.03	1.11	30.65	35.67
10/10/2023	17.55	0.03	1.11	30.42	35.32
10/11/2023	17.5947730	0.03	1.11	30.48	35.41

Tabela de cálculo do fluxo volumétrico de ar comprimido do CTG 2

Tabela A.2.3: Cálculos de fluxo volumétrico de ar comprimido do CTG 2.

Date	Pressão do	Fluxo real
	Compressor	[m³/min]
08/14/2023	24.44	34.63
08/29/2023	26.98	36.43
09/04/2023	25.03	35.05
09/11/2023	27.30	36.67
09/14/2023	28.25	38.33
09/18/2023	33.97	34.60
09/19/2023	22.61	37.86
09/21/2023	23.00	35.45
09/22/2023	23.65	36.02
09/26/2023	22.18	34.73
09/27/2023	24.25	36.55
09/28/2023	21.23	33.89
09/29/2023	22.17	34.74
10/02/2023	22.82	35.31
10/03/2023	23.39	35.81
10/04/2023	24.80	37.03
10/05/2023	23.16	35.61
10/06/2023	23.11	35.56
10/09/2023	23.23	35.67
10/10/2023	22.83	35.32
10/11/2023	22.93	35.41

Tabela de fluxo volumétrico em função da pressão no CTG 2

Tabela A.2.4: Fluxo volumétrico de acordo com a pressão.

P₁ [kPa]	P ₂ [kPa]	P2/P1	Y/(Y-1)	(Y-1)/Y	V1	WISEN	WREAL	рсомь
101 325	28 14	0 278	3 4 3 9	0 291	1	108 442	73 185	67 49%
101.325	24.89	0.246	3.439	0.291	1	116 862	76.435	65.41%
101.325	25.92	0.256	3.439	0.291	1	114,113	75.405	66.08%
101.325	28.09	0.277	3.439	0.291	1	108.566	73.235	67.46%
101.325	33.03	0.326	3.439	0.291	1	96,986	68.295	70.42%
101.325	22.46	0.222	3.439	0.291	1	123.683	78.865	63.76%
101.325	22.85	0.226	3.439	0.291	1	122.554	78.475	64.03%
101.325	23.49	0.232	3.439	0.291	1	120.731	77.835	64.47%
101.325	22.03	0.217	3.439	0.291	1	124.944	79.295	63.46%
101.325	24.08	0.238	3.439	0.291	1	119.081	77.245	64.87%
101.325	21.08	0.208	3.439	0.291	1	127.793	80.245	62.79%
101.325	22.02	0.217	3.439	0.291	1	124.973	79.305	63.46%
101.325	22.67	0.224	3.439	0.291	1	123.073	78.655	63.91%
101.325	23.24	0.229	3.439	0.291	1	121.439	78.085	64.30%
101.325	24.64	0.243	3.439	0.291	1	117.541	76.685	65.24%
101.325	23.01	0.227	3.439	0.291	1	122.095	78.315	64.14%
101.325	22.96	0.227	3.439	0.291	1	122.238	78.365	64.11%
101.325	23.08	0.228	3.439	0.291	1	121.895	78.245	64.19%
101.325	22.68	0.224	3.439	0.291	1	123.044	78.645	63.92%
101.325	22.77	0.225	3.439	0.291	1	122.785	78.555	63.98%

Tabela cálculo da eficiência do transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada do CTG 2

Figura A.2.5: Cálculo da eficiência do transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada do CTG 2.

ANEXO 3 – Experiências realizadas para a análise da eficiência do transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada no CTG 2



Figura A.3.1: Derrame de alumina das tremonhas.

Fonte: [Autoria própria, 2023]



Figura A.3.2: Verificação do transportador fluidizado horizontal e da caixa da junção, após o derrame de alumina fluorada pela deficiência de transporte de alumina fluorada no transportador vertical ascendente de alumina fluorada,


Figura A.3.3: Verificação de bloqueio de alumina no transportador horizontal de leito fluidizado.



Figura A.3.4: Limpeza semestral dos transportadores pneumáticos verticais ascendentes (ancoragem na caixa de expansão e ponto de colecta de scale na base do transportador).



Figura A.3.5: Troca do tecido de fluidização do transportador pneumático vertical ascendente de alumina fluorada do CTG 2.

AIR PERMEABILITIES



Figura A.3.6: Gráfico de escolha do tecido de fluidização (antigo: azul - 1600 & novo: preto - 800).

Fonte: [Autoria própria, 2023]



Figura A.3.7: Leitura do número de rotações.



Figura A.3.8: Esquema de polias e respectivas correias. Fonte: [https://www.iqsdirectory.com, 27/11/2023, 11:35]

Parâmetros do fabricante:

 $N_M = 1480 \text{ RPM e } n_C = 1409 \text{ RPM}.$

> Parâmetros provenientes da leitura no CTG 2:

 $N_M = 1474.14 \text{ RPM e } n_C = 1280.16 \text{ RPM}.$



Figura A.3.9: Polias de 300 e 315 com correias trapezoidais.

BELTS BITE





Figura A.3.10: Polias de 355 e 355 com correias dentadas.

ANEXO 4 - Relatórios de vibração do CTG 2

Relatórios de vibração de Junho

Machine Name : Fault Description :	3242BL002B 324 Blower 12-Jun-23 - Vibration Acceptable - Air Handler (Fan), Lobed Blower - DE & NDE				
Recommendation :	No Action Requi	ired	Normal		
Machine Name :	3242BL002M	324 Blower		1 - Normal	
Fault Description : 12-Jun-23 - Vibration Acceptable - Motor - DE & NDE					
Recommendation :	No Action Requi	ired	Normal		
Machine Name :	3242BL001B	324 Blower		1 - Normal	
Fault Description :	27-Jun-23 - Vik	pration Accept	able - Air Handler (Fan), Lobed Blowe	r	
Recommendation :					
Machine Name :	3242BL001M	324 Blower		1 - Normal	
Fault Description :	27-Jun-23 - Vik	pration Accept	able - Motor		
Recommendation :					

Relatórios de vibração de Julho

Machine Name : Fault Description : Recommendation :	3242BL002B 11-Jul-23 - Vi t	324 Blower pration Acceptable - Air Handler (Fan), Lobed Blower	1 - Normal
Machine Name : Fault Description : Recommendation :	3242BL002M 11-Jul-23 - Vi t	324 Blower pration Acceptable - Motor	1 - Normal

Relatórios de vibração de Agosto

Machine Name : Fault Description :	3242BL001M 324 Blower 23-Aug-23 - Vibration Acceptable - Motor - DE & NDE			1 - Normal	
Recommendation :	No Action Requir	ed	Normal		
Machine Name :	3242BL002B	324 Blower		1 - Normal	
Fault Description :	: 23-Aug-23 - Vibration Acceptable - Air Handler (Fan), Lobed Blower - DE & N				
Recommendation :	No Action Requir	red	Normal		

Relatórios de vibração de Setembro

Machine Name : Fault Description :	3242BL002B 324 Blower 27-Sep-23 - Vibration Acceptable - Air Handler (Fan), Lobed Blower - DE & N			1 - Normal ver - DE & NDE
Recommendation :	No Action Requir	ed	Normal	
Machine Name : Fault Description :	3242BL002M 27-Sep-23 - Vi	324 Blower bration Acceptable - Mot	tor - DE & NDE	1 - Normal
Recommendation :	No Action Requir	ed	Normal	
Machine Name : Fault Description : Recommendation :	3242BL001B 324 Blower 04-Sep-23 - Vibration Acceptable - Air		Handler (Fan), Lobed Blov	1 - Normal ver - DE & NDE
	No Action Requir	ed	Normal	
Machine Name : Fault Description : Recommendation :	3242BL001M 324 Blower 04-Sep-23 - Vibration Acceptable - Motor - DE & NDE			1 - Normal
	No Action Requir	ed	Normal	

Figura A.4.10: Relatórios de vibração do compressor do CTG 2.

Fonte: [MOZAL, 2023]



ANEXO 5 – Consumo de energia do CTG 2

Figura A.5.1: Consumo de energia com adição de ar comprido adicional.





Figura A.5.2: Consumo de energia na ausência de ar comprido adicional.

Fonte: [Trend, 2023]

ANEXO 6 – Instrumentos de medição



Figura A.6.1: Câmera termográfica. Fonte: [https://www.fluke.com, 27/11/2023]



Figura A.6.2: Tacómetro.

Fonte: [https://www.directindustry.com, 27/11/2023, 11:55]