



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Química

**Variabilidade da qualidade química das impurezas no
processo de desaguamento da
polpa de minério de ferro da Anglo American Brasil**

FILIPE MIRANDA SIMÕES

(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia da
Qualidade e Ambiente

Orientador(es):

Doutora Isabel Maria da Silva João

Doutor João Miguel Alves da Silva

Júri:

Presidente: Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos

Vogais:

Doutora João Fernando Pereira Gomes

Doutor João Miguel Alves da Silva

Junho de 2021



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Química

**Variabilidade da qualidade química das impurezas no
processo de desaguamento da
polpa de minério de ferro da Anglo American Brasil**

FILIPE MIRANDA SIMÕES

(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia da
Qualidade e Ambiente

Orientador(es):

Doutora Isabel Maria da Silva João

Doutor João Miguel Alves da Silva

Júri:

Presidente: Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos.

Vogais:

Doutora João Fernando Pereira Gomes

Doutor João Miguel Alves da Silva

Junho de 2021

Agradecimentos

A Deus, pela força e ajuda em todos os momentos, a Ele, a honra! À minha família, por acreditar em mim, entender por vezes a minha ausência e aceitar viajar mais de oito mil quilómetros d'além mar para partilhar comigo esse sonho. Daniele, João Filipe e Ana Luísa são o meu chão, a minha segurança. A minha gratidão e o meu amor incondicional! À minha mãe, Gesimara, por ser o meu Norte, e pelas palavras de conforto e esperança. Ao meu pai, que já não está mais aqui connosco, mas tenho a certeza que estaria a comemorar comigo! Aos meus irmãos, Leonardo e Davi, e à minha cunhada, Daya.

Em especial aos meus orientadores professores, Dra. Isabel João e Dr. João Silva, pela ajuda e pelo suporte, muito obrigado! À Anglo American, que me permitiu chegar até aqui, nomeadamente a Adarlan Silva, Sérgio Caldeira e Adail Júnior, vocês foram fundamentais e fazem parte desta conquista, obrigado!

Resumo

O minério de ferro é o metal básico mais utilizado no mundo, ele é base da economia e desenvolvimento. A Anglo American no Brasil possui o projeto Minas-Rio de produção de minério de ferro na cidade de Conceição do Mato Dentro, em Minas Gerais até a cidade de São João da Barra no estado do Rio de Janeiro. O óxido de silício, a sílica, é a principal impureza do minério de ferro e controlar a sua percentagem é fundamental. A cotação do mineral é dada pelo percentual de ferro, portanto, a impureza tem impacto comercial grande.

O Minas-Rio possui o maior mineroduto do mundo, com mais de quinhentos quilômetros de extensão, gerando um grande desafio quanto à variação das impurezas nas mais de 85 horas do início ao fim do processo de fabrico. A capacidade de se obter previsibilidade de chegada do minério e a sua composição química, devido à complexidade do projeto, é ao que se propôs o trabalho, ou seja, um modelo estatístico capaz de prever a chegada do minério e fundamentalmente a composição química da impureza principal, nomeadamente a sílica.

Palavras-chave: Minério, Ferro, Previsão, Modelo, Minas-Rio.

Abstract

Iron ore is the most used base metal in the world, it is the basis of the economy and development. Anglo American in Brazil has the Minas-Rio project to produce iron ore in the city of Conceição do Mato Dentro, in Minas Gerais to the city of São João da Barra in the state of Rio de Janeiro. Silicon oxide, Silica, is the main impurity of iron ore and controlling its percentage is fundamental. The mineral price is given by the percentage of iron; therefore, the impurity has a great commercial impact.

Minas-Rio has the largest pipeline in the world, with more than five hundred kilometers in length, creating a great challenge regarding the variation of impurities in more than 85 hours from the beginning to the end of the manufacturing process. The ability to obtain predictability of the arrival of the ore and its chemical composition, due to the complexity of the project, is what the work proposes, that is, to have a statistical model that can predict the arrival of the ore and fundamentally the chemical composition of the impurity, in particular silica.

Keywords: Ore, Iron, Forecasting, Model, Minas-Rio.

Lista de Abreviaturas e Acrónimos

CEI – Comunidade de Estados Independentes

EB – Estação de Bomba

ETM – Estação de Tratamento de Minério

MG – Minas Gerais

PIMS – Plant Information Management Systems

RJ – Rio de Janeiro

Índice

1. Introdução	13
1.1. Contextualização do problema.....	13
1.2. Motivação.....	15
1.3. Objetivos	16
1.4. Estrutura do trabalho.....	18
1.5. Minério de ferro	19
1.5.1. Minério de ferro – <i>Commodity</i> e mineração de minério de ferro na Europa, mundo e Américas.....	20
2. Modelos de previsão	23
2.1. Modelos de previsão	23
2.2. Modelos de previsão na indústria - histórico	24
2.3. Modelos causais e temporais, lineares e não lineares.....	25
2.4. Modelos causais	27
2.5. Séries temporais	28
3. A empresa.....	30
3.1. Histórico da Anglo American	30
3.2. O projeto Minas-Rio	31
3.3. O problema a abordar	37
3.4. Recolha de dados e tratamento	39
3.5. Modelos de média móvel simples - aritméticas.....	43
3.6. Variáveis críticas de processo, com impacto no modelo - Cálculo do tempo.....	49
3.7. Modelo estatístico com ajustamento das variáveis de processo.....	58
4. Apresentação dos resultados.....	62
4.1. Resultado do modelo proposto com série temporal atual	62
4.2. Apresentação de possíveis erros e desvios	64

Variabilidade da qualidade química das impurezas no processo de desaguamento da
polpa de minério de ferro da Anglo American Brasil

5. Conclusão	66
Referências	69

Índice de Figuras

Figura 1 - Ciclo de produção do minério de ferro na Anglo American, projeto Minas-Rio. (Anglo American Brasil, 2021).....	15
Figura 2 - Trabalhadores da Ford em 1913.....	24
Figura 3 - Usina de beneficiamento da Anglo American. (Anglo American Brasil, 2021)	31
Figura 4 - Diagrama esquemático do Minas-Rio. (Anglo American Brasil, 2021)	32
Figura 5 - Fluxograma de operações do Projeto Minas-Rio da Anglo American Brasil.	32
Figura 6 - Minério de Ferro Anglo American. (Anglo American Brasil, 2021) ...	34
Figura 7 - Construção do Mineroduto. (Anglo American Brasil, 2021)	35
Figura 8 - Filtragem do Minas-Rio. (Anglo American Brasil, 2021).....	36
Figura 9 - Trajeto do mineroduto Minas-Rio. (Anglo American Brasil, 2021) ...	41
Figura 10 - Terminal de minério de ferro do Porto de Açu. (Anglo American Brasil, 2021)	42
Figura 11 - Estrutura da media móvel com termo central, anteriores e posteriores.....	45
Figura 12 - Fluxograma do processo da Filtragem de São João da Barra . (Anglo American Brasil, 2021).....	54

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Reservas Mundiais de Minério de Ferro (BNDES, 2010).....	21
Tabela 2 - % Sílica por termo/hora.....	48
Tabela 3 - Tabela de dados Excel.....	60

Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Média e somatória dos erros absolutos no mês de janeiro.....	46
Gráfico 2 - Média Móvel às 04 h 00 do dia 01 de janeiro de 2021	47
Gráfico 3 - Média janeiro/21	62
Gráfico 4 - Média fevereiro/21	63
Gráfico 5 - Erro Absoluto da média móvel em relação ao empilhamento. Janeiro/21 e Fevereiro/21.	65
Gráfico 6 - Erro Absoluto 9P.....	65
Gráfico 7 - Ampliação de período de paragem no mês de janeiro 21	67

Índice de Equações

Equação 1 - Média do percentual de sílica.....	47
Equação 2 - Tempo total de chegada ao porto.	52
Equação 3 - Tempo de transporte do mineroduto.	53
Equação 4 - Tempo de filtração.	54
Equação 5 - Tempo de espessador	55
Equação 6 - Tempo de transformação de filtragem.	55
Equação 7 - Percentagem de sólidos.....	56

1. Introdução

1.1. Contextualização do problema

Ao longo da história da humanidade, a necessidade de compreender os fenómenos e de os prever sempre foi uma preocupação. Para a tomada de decisões na agricultura, como plantação, aplicação de fertilizantes, por exemplo, ou na meteorologia (previsão do tempo). Compreender e prever fenómenos, em que a informação, ou dados, é recolhida em intervalos de tempo iguais, que podem ser horas, dias, semanas, ou ao longo de um período mais ou menos longo é uma faceta particular da estatística, a análise de séries temporais (Xavier, 2016). Antever algum acontecimento é a garantia de adiantar-se a possíveis soluções, e na indústria não é diferente.

Em processos industriais, sejam eles mais ou menos complexos, modelos de previsibilidade garantem o planeamento das ações, bem como auxiliam na tomada de decisões estratégicas para o processo. Na mineração de minério de ferro, como em todos os processos industriais, conhecer as variáveis de controlo, como as impurezas, é fundamental para que se garanta a entrega do produto com as especificações químicas e físicas acordadas com o cliente.

O presente trabalho visa estudar a variação de sílica, o dióxido de silício - SiO_2 - na polpa (mistura de água e minério de ferro) da Anglo American Brasil no projeto Minas-Rio. O transporte da polpa é realizado por bombas em duto de aço carbono de aproximadamente 530 km, chamado de mineroduto, que une a

cidade de Conceição do Mato Dentro, no concelho de Minas Gerais, até à cidade de São João da Barra, no Rio de Janeiro (RJ), onde está localizada a unidade de filtragem (desaguamento) e o Porto do Açú, de onde o minério de ferro é exportado para todo o mundo, tendo no mercado asiático os seus grandes clientes.

Tendo em conta esta especificidade do projeto, a grande distância entre a mina e porto, variações nas impurezas ocorrem no processo de bombeio e de transporte até a Estação de Tratamento de Minério (ETM) e de desaguamento e filtragem. Essa falta de previsibilidade gera instabilidade no processo de empilhamento do minério nos pátios do porto e possíveis atrasos da entrega do minério aos clientes, causando perdas financeiras com multas por incumprimento dos prazos de embarque do minério de ferro.



Figura 1 - Ciclo de produção do minério de ferro na Anglo American, projeto Minas-Rio. (Anglo American Brasil, 2021)

1.2. Motivação

O preço do minério de ferro é o inverso do grau de impurezas presentes na sua composição, isto é, quanto mais impurezas na sua composição (sílica, alumina e fósforo), menor é o seu preço. Conhecer a variação de sílica, sendo a impureza de maior relevância quantitativa no minério de ferro, em todo o transporte, garante a certeza de alocar nos pátios de *stock* de matéria-prima o minério de características mais semelhantes, facilitando a recuperação e mitigando os atrasos no embarque.

O processo de beneficiamento é complexo e com muitas variáveis, entender o impacto do processo na variação das impurezas é fundamental e faz parte deste trabalho, e entender a magnitude do projeto em si é parte importante. O duto de transporte de minério de ferro, mineroduto, possui um comprimento de mais de 530 quilômetros, é quase a distância da cidade do Porto à capital de Espanha, Madrid, 555 km, e aproximadamente a distância de ida e volta entre Lisboa e Porto, 630 km.

O transporte do minério da mina para a estação de desaguoamento é de mais de 85 horas, visto que o volume do mineroduto é de aproximadamente 157.633 m³ e com caudal médio das bombas em 1850 m³/h (Anglo American, 2019). Garantir a previsibilidade das impurezas gera economia nos gastos de logística com o planeamento das ações e maior estabilidade operacional no processo a mitigar as variações na planta de filtragem da Anglo American Brasil.

1.3. Objetivos

Criar um modelo estatístico de previsibilidade capaz de prever em torno de 80 horas o percentual de sílica do empilhamento, através do tratamento de variáveis operacionais, análises químicas e físicas do minério de ferro do projeto Minas-Rio da Anglo American Brasil.

Para que o modelo seja construído, é necessário que se defina o percentual de sílica que chegará a saída do mineroduto, e o tempo da sua

chegada, daí a sua grande complexidade, visto que as variáveis operacionais são dinâmicas.

O tratamento de dados operacionais é fundamental na construção do modelo estatístico e foi apurado dos dados do período de janeiro de 2021 a fevereiro de 2021. O levantamento das principais variáveis de impacto, bem como a periodicidade das amostras deu-se no início do estudo. Posteriormente, foi necessário inserir todas as amostras na mesma linha de tempo, permitindo assim que os cálculos iniciais do modelo estatístico pudessem usar diferentes variáveis em condições temporais também diferentes.

Para cada dado calculado do modelo estatístico de previsibilidade de sílica oriundo das amostras na mina há um dado real, medido no momento do empilhamento do minério, isto é, após o desaguamento e antes de ser empilhado no porto.

Entender a relação temporal entre as análises do minério da mina e a análise do minério do empilhamento no porto, bem como o impacto das variáveis operacionais no tempo é a grande questão, a qual o trabalho se propõe a estudar.

As variáveis da mina, do transporte e do desaguamento são tratadas através de modelo estatístico, a gerar uma tendência para que seja possível de forma prévia o tratamento dos dados, a fim de obter a previsão de empilhamento, ou a tendência das impurezas no processo de empilhamento. O modelo terá valor percentual de sílica, e os resultados da análise de sílica do empilhamento, quando comparados com o modelo estatístico proposto, devem ter no máximo

0,40 % de erro absoluto médio por período medido, que no trabalho foi considerado mensal, em janeiro e fevereiro 2021.

1.4. Estrutura do trabalho

O trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro aborda a introdução, a contextualização, a motivação e o objetivo, descrevendo de forma resumida a importância do modelo de previsão de sílica no processo de bombeio da polpa de minério de ferro da mina até o porto. Neste capítulo introdutório, aponta-se para especificidades do projeto Minas-Rio e os seus desafios quanto à previsibilidade das impurezas no empilhamento. Ainda neste capítulo introdutório, é apresentada a importância do minério de ferro na sociedade, mostrando que o desenvolvimento da civilização e da evolução humana está ligado ao ferro. Fala-se ainda na *commodity* de ferro e os maiores produtores deste mineral.

No segundo capítulo, são abordados os diferentes tipos de modelos de previsão por média móvel, e a evolução histórica dos modelos causais, não casuais, lineares e não lineares.

O terceiro capítulo do trabalho aborda a empresa, mineradora de minério de ferro, a sua história, e evolução ao longo do tempo. Contextualiza o projeto Minas-Rio, local do estudo em questão, fala-se ainda dos processos e da sua característica de fabrico e os modelos estatísticos adotados e, fala-se das séries temporais e calculo do modelo de média móvel para cálculo da sílica .

No quarto capítulo apresenta os resultados, com seus erros e no último capítulo, o quinto capítulo, apresenta-se o as conclusões com algumas considerações.

1.5. Minério de ferro

O ferro está intimamente ligado ao desenvolvimento e à evolução humana, o período chamado de Idade do Ferro é estabelecido pelo primeiro surgimento registado de sociedades com conhecimento do manuseio do ferro, datado de 1200 anos a. C., ou seja, no século XII a. C., nas regiões do Oriente e do Sudeste da Europa. A Idade do Ferro marca, portanto, uma era arqueológica referente à utilização deste metal na fabricação de ferramentas e armas. A principal datação é a de que este período durou de 1200 a. C. a 550 a. C. Entretanto, já há indícios da utilização do ferro desde 3200 a. C., mas a sua larga utilização não se espalhou até que o completo domínio da técnica fosse desenvolvido. Esta técnica envolvia a capacidade de fundição do minério de ferro; a remoção das impurezas; e a regulação da quantidade de carbono (Andrade, 2018).

O minério de ferro é abundante na natureza, sendo as reservas mundiais estimadas em cerca de 800 bilhões de toneladas. Destas, apenas uma parte, da ordem de 230 bilhões de toneladas, é considerada economicamente explorável. Considerando-se a produção mundial atual da ordem de 950 milhões de toneladas por ano de minério de ferro, estas reservas são suficientes para atender ao consumo mundial por mais de 200 anos (BNDES, 2010).

Atualmente, o aço é a liga metálica de ferro mais conhecida, e é a sua forma mais produzida e utilizada. Os aços são ligas metálicas de ferro com outros elementos, tanto metálicos quanto não metálicos, que lhes dão propriedades distintas. É considerado aço uma liga metálica de ferro que contém menos de 2 % de carbono. No entanto, se a percentagem de carbono é maior, ele receberá o nome de “Ferro Fundido”. As ligas férreas possuem uma vasta diversidade de propriedades mecânicas, baseando-se na sua composição e no tratamento feito para atingir a tal liga. O ferro é o metal mais usado, com 95 % em peso da produção mundial de metal. Este é indispensável, devido ao seu preço economicamente acessível e pelas suas propriedades mecânicas como a dureza, especialmente empregado em automóveis, barcos e, principalmente, no de construção civil (Silva, 2019).

1.5.1. Minério de ferro – *Commodity* e mineração de minério de ferro na Europa, mundo e Américas

A extração de minério de ferro é uma importante indústria instalada principalmente em dez grandes produtores mundiais que são: China, Brasil, Austrália, Índia, Rússia, Ucrânia, África do Sul, Irão, Canadá e Estados Unidos (IPEADATA, 2012).

Variabilidade da qualidade química das impurezas no processo de desaguamento da polpa de minério de ferro da Anglo American Brasil

Países	Minério de Ferro Mt	Participação %	Teor Médio do Ferro %
CEI	78 000	34	37,2
Austrália	28 000	12,2	63,9
Canadá	26 000	11,3	38,5
Estados Unidos	25 200	10,9	23,8
Brasil	19 000	8,3	53,2
Índia	12 000	5,2	52,5
África do Sul	9 300	4,1	63,4
China	9 000	3,9	38,9
Suécia	4 600	2	52,2
Venezuela	3 300	1,4	51,5
Outros Países	15 500	6,7	53,6
Total	229 900	100	48,1

Tabela 1 - Reservas Mundiais de Minério de Ferro (BNDES, 2010)

A CEI, Comunidade dos Estados Independentes, formada por países do leste europeu, oriundos da extinta União Soviética, já foi o maior produtor mundial, mas vem apresentando declínio na sua produção. O Brasil, segundo maior produtor mundial, manteve a produção na faixa de 150 milhões, o que representa cerca de 17 % da produção mundial. A Austrália apresenta produção correspondente a 34 % do total mundial, para o ano de 2009 (BNDES, 2010).

O minério de ferro é negociado em bolsa *commodities* em todo mundo, sendo o seu preço definido pelo mercado para entregas futuras, sujeito a flutuações, como a demanda ou escassez, por exemplo. As principais bolsas encontram-se na China, como a de Dalian e Shanghai, por ser o grande consumidor global de ferro, e essas bolsas tornam-se referência na cotação do

minério de ferro no mercado asiático e mundial. A cotação de minério de ferro é diretamente proporcional a indicadores que determinam o produto interno bruto de países em desenvolvimento produtores como Brasil e África do Sul e consumidor como a China. Quando há queda do preços do minério de ferro por tempo demasiado longo, o produto interno bruto deste países é de alguma forma é afetado, como por exemplo com tendência de queda.

2. Modelos de previsão

2.1. Modelos de previsão

Atualmente, na nossa sociedade, as previsões desempenham um papel muito importante, nomeadamente nas empresas, nos estudos e até mesmo no quotidiano, como por exemplo, no clima.

Previsão é estimar o futuro, e isto é uma ferramenta extremamente útil quando há necessidade e utilidade de se prever o futuro, de forma a prevenir eventuais imprevistos, complicações e custos desnecessários em situações do quotidiano, seja na sociedade ou em indústrias. Prevê-las implica também erros, uma vez que o evento futuro é incerto, e não é garantido que certamente ocorra (Machado, 2012).

Conhecer a natureza dos dados e os tipos dos dados que serão tratados é fundamental, inclusive, as variáveis de processos que afetam o modelo, pois assim será possível obter melhor resultado, que é a previsão do percentual de impureza, sílica, no embarque de minério de ferro da Anglo American Minério de Ferro Brasil. Sabendo antecipadamente do resultado de impureza, o tempo médio de transporte da mina até ao porto é em torno de 90 horas com caudal médio de 1850 m³/h, haverá condição de otimização do processo de fabrico, desaguamento da polpa e conseqüente empilhamento e embarque no porto.

2.2. Modelos de previsão na indústria - histórico

Modelos são usados na indústria há bastante tempo e foram fundamentais na Revolução Industrial do início do século XX. Em 1913, Henry Ford desenvolve o modelo de controlo de *stock* na sua indústria de automóveis, onde a cada ciclo de reposição eram anotadas todas as informações de consumo para que fosse criado um histórico de eventos, e com bases nos dados, a gestão dos insumos de fabrico dos carros fosse gerido e houvesse previsão de consumo, a fim de gerar ganhos económicos.



Figura 2 - Trabalhadores da Ford em 1913.

O tratamento dos dados evoluiu com o passar dos anos, e dados anotados em papel pela mão de trabalhadores passaram a ser substituídos por dados automatizados, ganhando assim confiabilidade.

Os dados para o trabalho foram extraídos de sistema informático PIMS, ou Plant Information Management Systems, que são sistemas que adquirem dados de processo de diversas fontes, os armazenam num banco de dados históricos e os disponibilizam através de diversas formas de representação. Sendo assim os dados necessários, o caudal do mineroduto e das diversas bombas, bem como níveis de tanques e produção, e, inclusive, análise de qualidade química das amostras que foram extraídas deste sistema e exportadas para uma planilha em Excel.

2.3. Modelos causais e temporais, lineares e não lineares

A indústria deve gerir a sua incerteza em relação aos níveis de previsão de procura, conduzindo ao desenvolvimento de vários métodos de previsão. Métodos estatísticos clássicos têm vindo a ser usados durante várias décadas para prever estes níveis de previsão (Et, 1999).

Uma previsão consiste na tentativa de extrapolar o comportamento futuro a partir das condições atuais, utilizando dados históricos do passado (Caiado, 2002).

Modelos baseados em séries temporais são funções presentes em várias áreas do conhecimento e em vários instantes de tempo, essa análise necessita de um maior detalhamento e quantidade de dados, aumentando a sua eficiência. Para isto, os modelos temporais utilizam um número razoável de

dados históricos para poder fazer a projeção da demanda, a tendência e variações sazonais nas séries de tempo devem ser estáveis e precisas para que a previsão seja mais coerente com o real (Ballou, 2006). Os modelos de decomposição de série temporais se fundamentam no estudo da demanda anterior para projetar a demanda futura de produtos que possuam históricos de vendas e uma situação estável no seu ciclo de vida, não sofrendo tantas variações de um período para outro. Dentre os métodos de previsão de demanda baseados em séries temporais, estes podem ser métodos de médias móveis simples, ponderadas e exponenciais (Peinado & Graemi, 2007)

A previsão da variabilidade química das impurezas no processo de desaguamento da polpa de minério de ferro recorre fundamentalmente a métodos quantitativos baseados em séries temporais. Assim, para este estudo, optou-se pelo modelo de média móvel simples.

Os Métodos de Previsão, ao preverem os níveis, providenciam os *inputs* para o planeamento e controlo de *stocks* e podem ser um instrumento de auxílio à determinação dos níveis de *stock* de uma organização (Ballou, 2006).

Os modelos de previsão segundo (Gonçalves, 2010) dividem-se em dois tipos:

(i) Os modelos qualitativos, por se basearem em estimativas e opiniões, são considerados modelos subjetivos. Estes modelos são utilizados sempre que não existam dados históricos, ou caso existam, não sejam representativos do futuro. As técnicas qualitativas são utilizadas para previsões a médio e a longo prazo.

(ii) Os modelos de previsão quantitativos assentam no conceito da utilização dos

dados históricos da procura para estimar a procura no futuro. Urge identificar padrões nos dados históricos e transpor este padrão para o futuro. Dentro dos modelos quantitativos existem os modelos causais e os modelos de séries temporais.

2.4. Modelos causais

A premissa na qual os modelos causais de previsão são construídos é a que a procura é descrita como um fator ou fatores subjacentes ao meio ambiente, isto é, o nível de previsão de uma variável deriva do nível da previsão de outras variáveis relacionadas com a primeira. Se, por exemplo, o nível de atendimento ao cliente tem um efeito positivo nas vendas, então, sabendo o nível de previsão do atendimento ao cliente, o valor de vendas pode ser projetado (Pais, 2017).

Os modelos causais podem ser estáticos, no caso das regressões lineares, e descritivos, em modelos de simulação computacional.

No entanto, as variáveis causais são difíceis de estimar e encontrar e quando estas variáveis são encontradas, a sua previsão tende a ser muito baixa.

É então aconselhada a utilização dos métodos qualitativos em conjunto com os métodos quantitativos, para se proceder de forma mais eficaz a uma análise crítica dos resultados e previsões obtidos (Ballou, 2006).

2.5. Séries temporais

Define-se uma série temporal como um conjunto de observações associadas a determinado fenômeno aleatório, efetuadas em períodos de tempo sucessivos e estatisticamente relacionados (Brockwell & Davis, 1991).

A análise de séries temporais é uma abordagem sistemática que permite não só compreender como uma variável se altera ao longo desse mesmo período de tempo, proporcionando assim uma descrição dos dados, como também permite estabelecer uma relação entre duas ou mais variáveis, ao longo de um determinado período de tempo.

A análise supracitada considera quatro componentes, a saber: tendência, sazonalidade, movimentos oscilatórios ou cíclicos e movimentos aleatórios - ruído (Pais, 2017).

A série temporal é uma descrição do passado, um procedimento lógico para realizar previsões é fazer uso desses dados históricos. Se os dados passados são indicativos do que se pode esperar no futuro, pode-se então postular um modelo matemático que é representativo do processo. O modelo pode então ser usado para gerar previsões (Nogueira, 2019). A suposição básica que norteia a análise de séries temporais é que há um sistema causal mais ou menos constante, relacionado com o tempo, que exerceu influência sobre os dados no passado e pode continuar a fazê-lo no futuro. Este sistema causal costuma atuar criando padrões não aleatórios que podem ser detetados num gráfico da série temporal, ou mediante algum outro processo estatístico.

No trabalho, foi utilizado o período de janeiro e fevereiro de 2021, a fim de gerar a base de dados suficientes para ajuste temporal da média móvel para previsão do percentual de sílica, portanto, o modelo proposto no trabalho é quantitativo temporal.

3. A empresa

3.1. Histórico da Anglo American

A história da Anglo American começou em 1917 com uma mina de ouro em Joanesburgo, na África do Sul, fundada por Sir Ernest Oppenheimer. Na década de 30, a empresa descobriu como utilizar diamantes de baixa qualidade em equipamentos de perfuração e começou a construir a sua sede na África do Sul. Na década seguinte, o grupo expandiu a sua atuação para o negócio de carvão, o que contribuiu para a independência energética sul-africana (Anglo American Brasil, 2021).

Nos anos seguintes, o grupo seguiu com investimentos em pesquisa e tecnologia, diversificando cada vez mais os seus negócios de mineração. Em 1973, a Anglo American chegou ao Brasil com um escritório no Rio de Janeiro, considerado o primeiro passo de uma nova estratégia de negócio, que levaria futuramente às operações de ouro, níquel, nióbio, fosfatos e minério de ferro no país (Anglo American Brasil, 2021).

Em 1999, a Anglo American África do Sul uniu-se à Minorco para formar a Anglo American plc, com ações listadas na Bolsa de Londres. E no Brasil, a Anglo American produziu cerca de 26,5 milhões de toneladas de minério de ferro no ano de 2020, no projeto Minas-Rio.

3.2. O projeto Minas-Rio

O projeto Minas-Rio é o maior investimento da Anglo American de toda a sua história. O empreendimento que está em fase de *ramp-up* e que possui capacidade para 26,5 milhões de toneladas de produção possui mineroduto, isto é, uma extensa tubulação em aço especial que leva o minério de ferro extraído na Mina, em Conceição do Mato Dentro, em Minas Gerais, até ao terminal de minério de ferro no Porto do Açu, em São João da Barra, no Rio de Janeiro, o maior duto de minério de ferro do mundo, atravessando 33 municípios de Minas Gerais e do Rio de Janeiro (Anglo American Brasil, 2021).



Figura 3 - Usina de beneficiamento da Anglo American. (Anglo American Brasil, 2021)

O transporte de polpa de minério de ferro da cidade de Conceição do Mato Dentro, em Minas Gerais, até a estação terminal de São João da Barra, no estado do Rio de Janeiro, é feito por meio de um mineroduto com extensão de 532 km. O diâmetro predominante no duto é de 26 polegadas. Ele tem a capacidade de transportar mais de 26 milhões de toneladas de concentrado de

minério de ferro por ano. A figura 4 apresenta um fluxograma esquemático do processo Minas-Rio mostrando a configuração do mineroduto dentro do sistema apresentado. (Junior, 2014).



Figura 4 - Diagrama esquemático do Minas-Rio. (Anglo American Brasil, 2021)

Os dados para análise das impurezas foram realizados no projeto Minas-Rio da Anglo American, que possui os processos de Mina, Estação de Bombas, Mineroduto, Espessador, Tanques e Filtragem e Empilhamento, sendo que as últimas três operações ocorrem na Estação Terminal, localizada no porto do Açú.

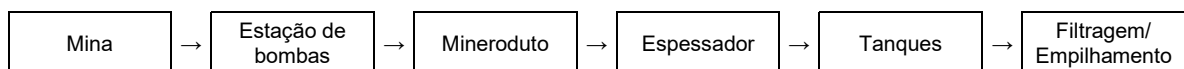


Figura 5 - Fluxograma de operações do Projeto Minas-Rio da Anglo American Brasil.

Na etapa de mina, o minério é retirado do local de extração, e, para o Projeto Minas-Rio, a mina está localizada na cidade de Conceição do Mato

Dentro, no Distrito de Minas Gerais. Nesta fase, o minério passa por uma etapa de beneficiamento na qual as suas características físicas e químicas são ajustadas. Na fase de mina, há processos de moagem, prensa e flotação que reduzem o tamanho das partículas através da cominuição do minério nos moinhos e prensa e justam-se as impurezas através da flotação com amido. Flotação é um dos processos de concentração mais empregados para a separação seletiva de minérios. No método de flotação, trabalham-se as diferenças nas características de densidade específicas dos minerais, tratando misturas diferentes de partículas suspensas em fase aquosa, nas quais se introduz uma fase gasosa. Para que este processo aconteça, é necessário que o mineral possua características hidrofílicas, isto é, afinidade com a água. Uma propriedade diferenciadora deve ser induzida através da adição de reagentes na superfície dos minerais que, no caso do Minas-Rio, é o amido e que tem por objetivo dotar de características hidrofóbicas os minerais que se deseja flotar. Além das diferenças nas características de superfície das partículas envolvidas no processo, outros fatores também devem ser considerados, tais como o tamanho das partículas, o pH da solução e os equipamentos utilizados (Santos, 2012).



Figura 6 - Minério de Ferro Anglo American. (Anglo American Brasil, 2021)

Com as características físicas e químicas ajustadas, o minério é preparado para o transporte e até ao Porto do Açu. As estações de bombas empurram o minério através do mineroduto até a chegada à estação terminal, onde decorrem as demais etapas do processo de fabrico do minério de ferro.



Figura 7 - Construção do Mineroduto. (Anglo American Brasil, 2021)

Considerado um sistema de baixo impacto ambiental, seguro e económico, o mineroduto conduz o concentrado de minério de ferro produzido no interior de Minas Gerais até ao terminal no Porto do Açu, em São João da Barra (RJ). O transporte é parte crítica de todo processo, demorando, da saída em Conceição do Mato, na mina, até à chegada no Porto, mais de 90 horas, visto que o projeto possui mais de 530 km de extensão de dutos.

O desaguamento do minério de ferro é feito no espessador de concentrado, localizado no Porto do Açu, e a polpa espessada é armazenada em tanques para servir de *stock* para a fase de filtração.

A filtração ou filtragem do Minas-Rio utiliza a tecnologia e filtros cerâmicos. Ao todo, são 14 filtros, cada um com 180 placas, que devido ao seu

efeito capilar – propriedade física que os fluidos têm de subir ou descer em tubos extremamente finos e molhar um material específico – oferecem um diferencial significativo para o processo de filtração do minério de ferro: uma economia de 95 % de energia elétrica em relação ao método convencional.

A Filtração do Projeto Minas Rio, Figura 8, é composta por 14 filtros cerâmicos com 144 m² de área cada. Essa filtração será responsável pela produção mais de 26 milhões de toneladas por ano de pellet feed com umidade em torno de 8 % em massa. (Junior, 2014)



Figura 8 - Filtração do Minas-Rio. (Anglo American Brasil, 2021)

A produção de *pellet feed* tem um menor custo, e os filtros cerâmicos são mais eficazes do que as outras tecnologias existentes. O seu custo de instalação é menor, reduz-se o gasto com energia elétrica e não necessita de um processo adicional para promover a melhoria do efluente gerado. A planta de filtração fica no Porto do Açu, em São João da Barra, no Rio de Janeiro, onde

também está localizado o terminal de minério de ferro por onde o *pellet feed* é exportado.

O filtro de disco cerâmico é semelhante ao filtro de disco a vácuo convencional, mas com a diferença de o meio filtrante ser feito de cerâmica porosa, o que promove a retenção do *pellet feed* e a passagem do filtrado por ação capilar, a qual cria um nível de vácuo extremamente elevado. As placas são produzidas em alumina sinterizada, com microporos uniformes, permitindo que apenas o líquido atravesse o leito.

O minério com humidade controlada é empilhado no pátio de *stock* de acordo com a sua característica química, para posterior carregamento em navios para o mercado externo.

3.3. O problema a abordar

O Minas-Rio dispõe do maior mineroduto em operação do mundo, isto gera um grande desafio quanto à operacionalidade do projeto, nos seus mais de quinhentos e trinta quilómetros de distância, entre a mina localizada em Conceição do Mato Dentro e o porto localizado em São João da Barra no Rio de Janeiro. No início do processo de bombeio do minério de ferro, antes da entrada da polpa de minério no mineroduto, é realizada análise química que busca verificar o percentual dos elementos químicos presentes na amostra de polpa. Sabe-se então o percentual de ferro, alumínio, fósforo e, principalmente, o silício, em forma de óxido.

No quilómetro zero do duto de transporte do minério de ferro, através de estação de bombas 1, é iniciado o bombeio, com o objetivo de transportá-lo para a unidade de desaguamento localizado à distância de 532 quilómetros, na cidade de São João da Barra, onde está também o porto.

O tempo médio estimado para que o minério de ferro saia da mina e chegue ao porto é de quatro dias, ou em torno de 85 horas, a uma velocidade média de 6 km/h. Nesse trajeto, o minério, misturado com a água, passa por diversas variações de terreno, com áreas planas e montanhosas, como a Serra da Mantiqueira. Assim, em alguns trechos, é preciso impulsioná-lo e, noutros, freá-lo. Esse controlo é feito nas estações de superfície do mineroduto, que englobam as Estações de Bombas 1 e 2 (EB1 e EB2) e a Estação de Válvulas.

As estações de bombas têm a função de impulsionar a polpa de minério de ferro. A EB1, que fica em Conceição do Mato Dentro, dá o empurrão inicial, enquanto a EB2, em Santo Antônio do Gramma (MG), terá o papel de impulsionar a polpa para atravessar a parte mais íngreme, a Serra da Mantiqueira. Já a Estação de Válvulas tem função oposta, ou seja, ela reduz a velocidade na descida da serra. Essa estrutura foi construída no município de Tombos, em Minas Gerais.

Há muitas variáveis que impactam a chegada do minério, e conhecer o percentual de impureza que será empilhado no porto, após o desaguamento, tem sido um grande desafio para a operação da planta de filtragem e do porto, e principalmente para a área comercial, tendo em vista que o minério é vendido de acordo com o seu percentual de pureza, isto é, o preço é inversamente

proporcional ao percentual de impureza, quanto menos impureza, maior é o valor da tonelada de minério.

Responder à necessidade de se criar um modelo que fosse capaz de prever, com alguma confiabilidade, o resultado de sílica, logo no início do bombeamento, ou seja, em torno de 80 horas antes do empilhamento (o tempo da mina ao porto é em torno de 85 horas, variando conforme o caudal das bombas do mineroduto), é o objetivo deste trabalho. Mas variáveis de processo devem ser conhecidas e estudadas para que o resultado final seja alcançado.

3.4. Recolha de dados e tratamento

Analisar as variáveis de processos que impactam no modelo de previsão foi o primeiro passo. Dados importantes de processo com impacto no modelo de estudo são todos os fatores que influenciam no tempo de chegada da polpa e o seu tratamento na planta de desaguamento.

A Anglo American possui os seus dados de processo no sistema informático - PIMS, que são migrados para ficheiro em Excel, permitindo que os dados sejam recolhidos e tratados, gerando todas as variáveis necessárias para este estudo.

Os dados de processo e as variáveis de processo fundamentais, tais como caudal das bombas de mineroduto e espessador, resultados de análise química da polpa, taxas horárias de produção, resultados de qualidade da polpa na mina e na filtragem, foram analisados em conjunto, na mesma escala de

tempo a possibilitar análise prévia para um modelo estatístico proposto pelo trabalho, pois todas essas variáveis interferem de alguma forma no modelo.

As variáveis oriundas do processo da mina foram medidas na entrada da estação de bombas, ou seja, na entrada do mineroduto no quilômetro zero. Foram coletadas amostras a cada hora do minério de ferro, e nessas amostras foram realizadas análises químicas, nas quais se conheceu o percentual de ferro, sílica e outras impurezas. São conhecidas também as variáveis físicas como tamanho do grão – granulometria, visto que o transporte acontece em duto de aço, granulometria grosseira, há desgaste prematuro dos componentes e também é medida a densidade e a massa específica do minério de ferro, a influenciar diretamente no transporte da polpa.

Na hora zero do transporte, ou seja, no início do bombeio, no quilômetro zero, têm-se os resultados e eles repetem-se a cada hora, com nova amostra coletada até a chegada no minério à estação terminal, no quilômetro 532 do duto. Ao chegar à estação terminal, o minério é deslocado para o espessador onde é espessado e encaminhado para tanques de armazenagem, a fim de aumentar o percentual de sólidos do minério e a produtividade do processo de filtração.

Variabilidade da qualidade química das impurezas no processo de desagramento da polpa de minério de ferro da Anglo American Brasil

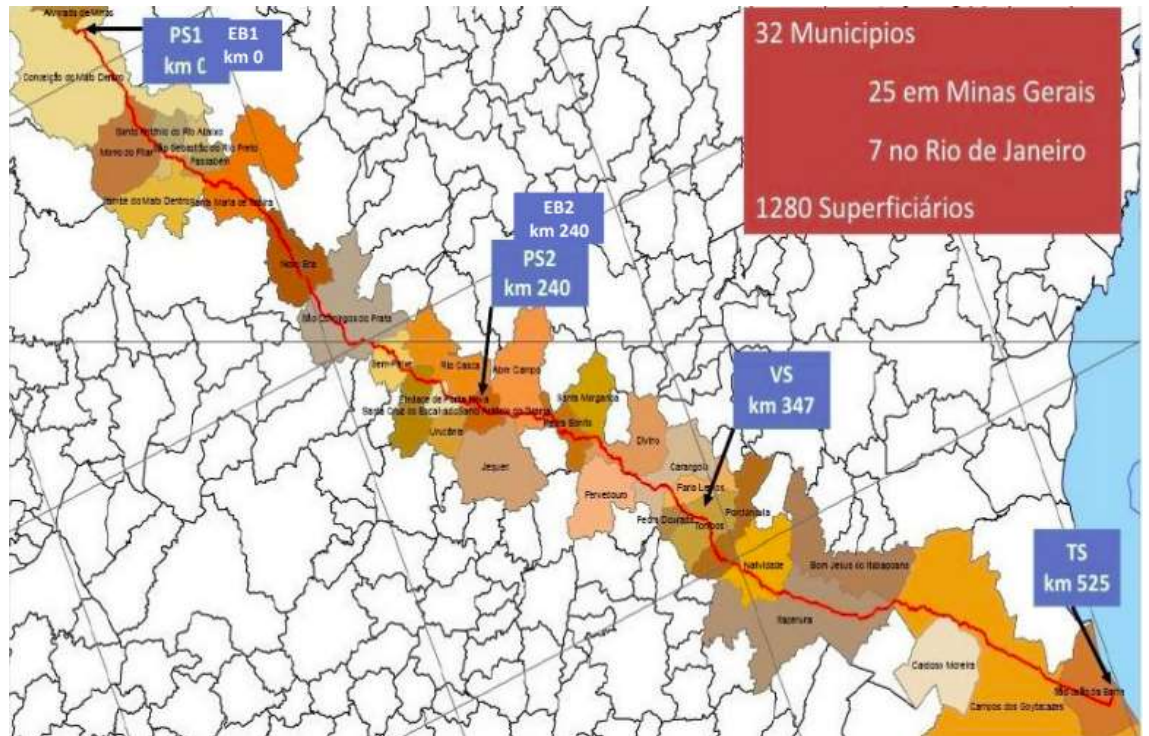


Figura 9 - Trajeto do mineroduto Minas-Rio. (Anglo American Brasil, 2021)

Na etapa de espessamento e de filtragem no porto do Açú, ocorre outra amostragem, na saída dos filtros cerâmicos, em que é realizada a análise química e física do minério. Essa amostra da filtragem foi utilizada no trabalho para verificação da efetividade do modelo proposto.



Figura 10 - Terminal de minério de ferro do Porto de Açu. (Anglo American Brasil, 2021)

Os dados das variáveis operacionais, como caudal e densidades e as análises físicas e químicas no início do processo na hora zero foram a base do modelo, e os dados de filtragem do final do processo foram a base da verificação do modelo e de possíveis ajustes.

A base de dados do modelo tem mais de cinco mil dados, que são das variáveis operacionais que influem no modelo estatístico proposto.

São analisadas variáveis de natureza química e física que ocorrem no processo de beneficiamento do minério de ferro. O percentual de sílica, variável medida à entrada do mineroduto, nas Minas Gerais, e antes do empilhamento, em São João da Barra, é realizado através de análise de fluorescência de raios X. É uma técnica analítica utilizada para determinar a composição química de uma ampla variedade de tipos de amostras, incluindo sólidos, líquidos e pastas. A fluorescência de raios X também pode ser utilizada para determinar a

espessura e a composição das camadas e revestimentos. Os resultados de sílica, que são medidos a cada hora, à entrada no mineroduto e à saída do empilhamento, no porto, são as bases do modelo de média móvel de sílica, com ajustamento das variáveis operacionais.

3.5. Modelos de média móvel simples - aritméticas

Modelos estatísticos podem ser das mais diversas formas, e é importante analisar o tipo de dado e as suas variáveis para adequar o melhor modelo a aplicar. No trabalho em questão, a série temporal e os tipos de dados deram-se de forma a avaliar o modelo estatístico de média móvel, a simples ou aritmética, para a principal impureza do minério de ferro que é a sílica.

A média móvel simples é um importante indicador de tendência, a partir da amostra de forma sequencial é calculado a média móvel simples. Dada uma sequência de valores, o primeiro elemento numa média móvel é a média da primeira subsequência finita destes valores. Médias móveis são comumente usadas com séries temporais para suavizar flutuações curtas e destacar tendências de longo prazo. O limite entre curto e longo prazo depende da sua aplicação, bem como dos parâmetros da média móvel, como, por exemplo, o tamanho da subsequência (Silva Martins, 2012).

A definição no número de termos utilizados é importante, pois ele determina a curva de suavização ou de correção da tendência a ser analisada,

isto é, o modelo proposto é com base no percentual de impurezas no empilhamento, nomeadamente sílica. Fundamentalmente, há de utilizar-se o resultado da análise química à entrada do mineroduto, na mina, juntamente com as demais variáveis de processo para se criar o modelo estatístico de média móvel simples. O número de termos e a metodologia foram definidos com base no erro absoluto entre o modelo proposto e resultado de sílica empilhado. É de fundamental importância que a diferença entre o valor calculado pelo modelo a entrada do mineroduto e o valor medido (em laboratório a saída da filtragem, no empilhamento do minério) no porto, fosse o menor possível. Daí a escolha de medir-se o erro absoluto entre o valor a entrada do mineroduto e a saída, no porto.

As análises foram realizadas onze, nove, sete e cinco termos, observando sempre a regra de ter um termo central e termos seguintes e anteriores no mesmo número para completar o total dos respectivos termos. Isto é para onze termos, o termo central é o x6, com cinco termos anteriores a ele, e cinco termos posteriores ao termo central a totalizar onze termos. O termo central é a hora corrente, isto é, hora que será calculado a chegada na estação terminal no próximo item deste trabalho, no cálculo do tempo. (Junior, 2014)

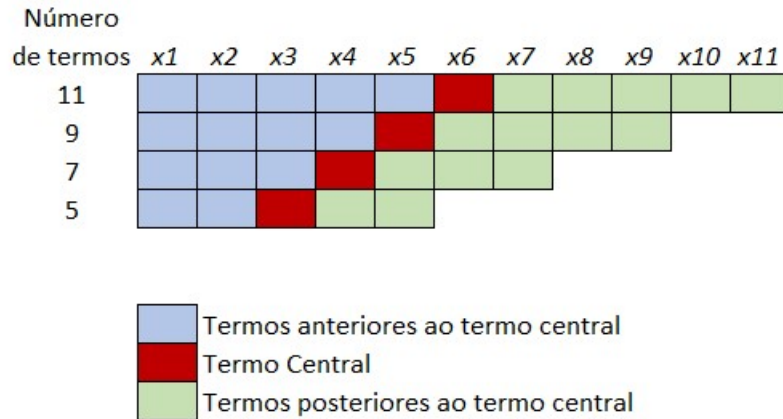


Figura 11 - Estrutura da média móvel com termo central, anteriores e posteriores.

Na figura 11, estão exemplificados em castanho o termo central, os termos anteriores em azul e os posteriores em verde. A definição do número de termos é de suma importância para o modelo, visto que variações no percentual de sílica ocorrem na fase beneficiamento em mina, e é fundamental que o modelo ajuste os valores, portanto com muito termos o ajuste é mais suave, com menos termos o ajuste é mais agressivo. Por outro lado, mais termos dão robustez ao resultado de sílica, pois abrangem um maior número de horas analisadas, acontecendo o contrário quando se tem menos termos. O desafio deste trabalho foi encontrar a quantidade ideal de termos, onde o ajuste fosse relativamente rápido, e com o maior número possível de termos. Essa decisão foi tomada com base no erro absoluto, quanto menor o erro absoluto, mais adequado será o número de termos.

A média móvel com 9 termos foi o escolhido para o trabalho, onde o termo central, quatro antes e quatro depois, com isto tinha-se a média móvel com

9 termos ou 9P. Considera-se para o modelo a hora 0, o exato momento em que se inicia o bombeio da polpa de minério, e através de variáveis de processo, junta-se ao modelo estatístico a fim de se ter o tempo calculado de chegada do minério, com base nas análises químicas de média móvel, a criar-se então a previsão de empilhamento.

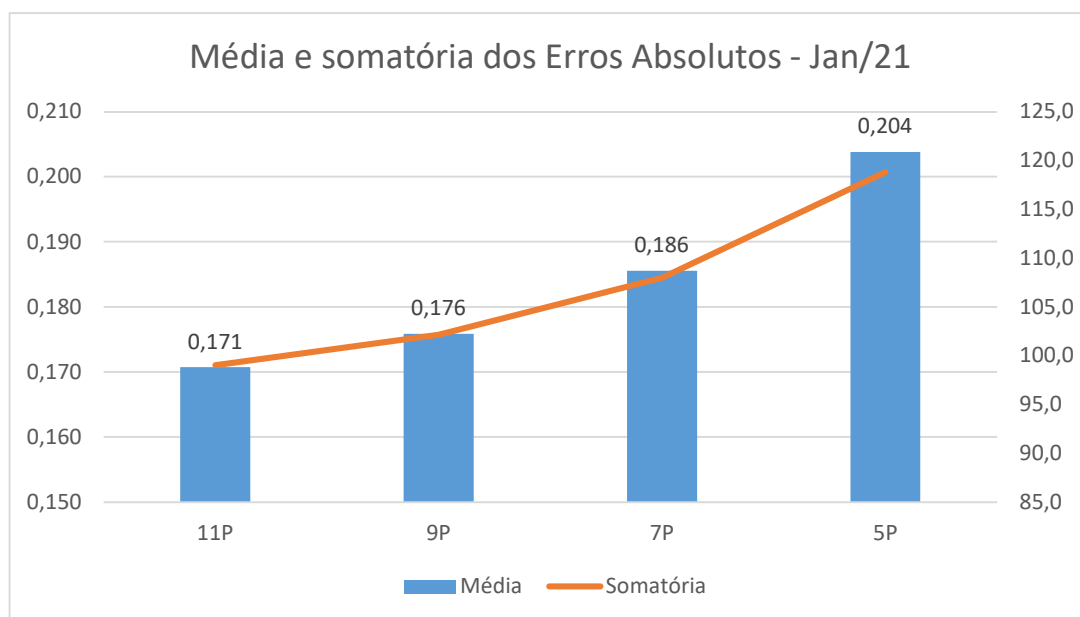


Gráfico 1 - Média e somatória dos erros absolutos no mês de janeiro.

Apesar de no mês de janeiro a média do erro absoluto de 11 termos ser ligeiramente menor, comparando 0,171 ao valor obtido pela média de nove termos, 0,176, foi usado no modelo do trabalho, visto que a correção para desvios maiores tende a ser mais rápida, e a diferença não se mostrou grande o suficiente para se justificar a média com 11 termos. Como o modelo usa análises que ocorrem após o bombeamento, ao optar em usar a média móvel de 9 termos, tem-se o resultado duas horas antes em relação a média de 11 termos. Para

estes resultados, foram considerados o tempo calculado e demonstrado no capítulo 4.6 deste trabalho.

A média do percentual de sílica de nove termos, \bar{x} , é calculado pela média do percentual de sílica à saída da mina, na entrada do mineroduto. A média dá-se com a somatória das nove análises de sílica seguidas, chegando-se ao termo central da média, o x_5 .

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_9}{9}$$

Equação 1 - Média do percentual de sílica.

De forma prática, a fim de exemplificar o modelo, ao utilizar o modelo de media móvel proposto no trabalho, o bombeamento ocorrido às 04 h 00 do dia primeiro de janeiro de 2021, a ser o quinto termo do modelo, o x_5 , a média móvel será a média dos valores de sílica à entrada no mineroduto no período de 00 h 00 às 08 h 00 do dia 01 de janeiro de 2021.

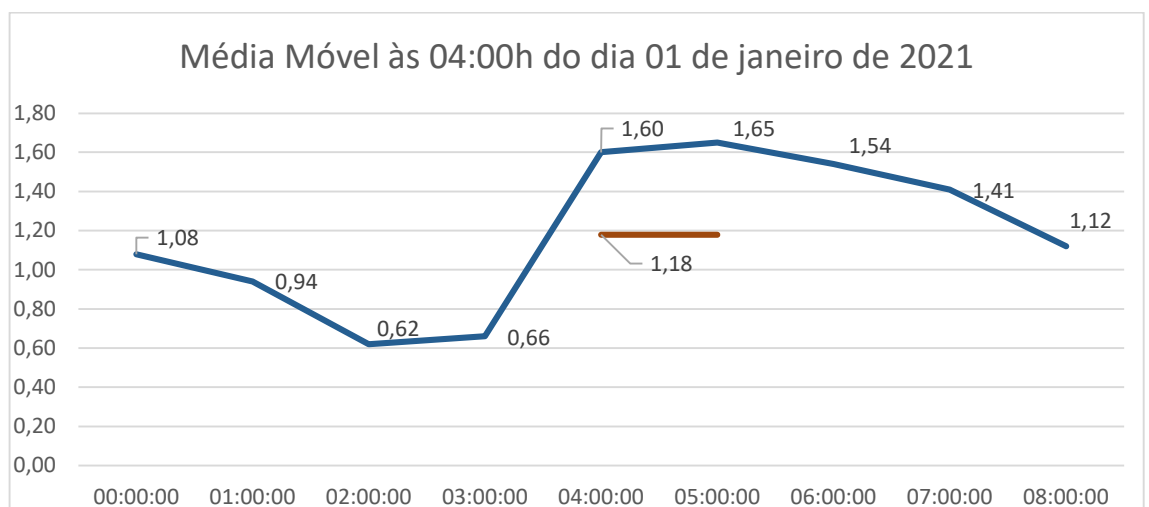


Gráfico 2 - Média Móvel às 04 h 00 do dia 01 de janeiro de 2021

No gráfico, a linha em azul representa os valores da sílica no intervalo de 00 h 00 às 08 h 00 horas e, em magenta, apresenta a média dos resultados, que é de 1,18 %. Ou seja ao aplicar a equação 1, para definir o percentual de sílica às 04 h 00 do dia 01 de janeiro de 2021, considerando o primeiro termo x_1 , às 00 h 00, com resultado de sílica no valor de 1,08 % e o nono termo 1,12 % o x_9 , às 08 h 00, o valor médio admitido às 04 h 00 será de 1,18 % .

É possível admitir a utilização de termos posteriores (itens em verde na figura 11) no modelo, pois o tempo de transporte da mina ao porto é superior a 85 horas, a variar pelo caudal de transporte do mineroduto, isto é, o modelo tem previsibilidade de 81 horas em média. Em termos práticos, a considerar o exemplo de 04 h 00 do dia 01 de janeiro de 2021, é possível utilizar os valores de sílica entre 05 h 00 e 08 h 00, pois o tempo médio é de 85 horas de uma extremidade à outra do mineroduto, sendo porém esse o intervalo de tempo necessário para a robustez do modelo de média móvel.

Hora	Termo	% Sílica
00 h 00	x_1	1,08
01 h 00	x_2	0,94
02 h 00	x_3	0,62
03 h 00	x_4	0,66
04 h 00	x_5	1,60
05 h 00	x_6	1,65
06 h 00	x_7	1,54
07 h 00	x_8	1,41
08 h 00	x_9	1,12
Média		1,18

Tabela 2 - % Sílica por termo/hora

Após o cálculo do percentual de sílica, é necessário o cálculo do tempo de transporte em mineroduto e transformação na estação terminal, no espessador e filtros cerâmicos. Os valores médios obtidos de percentual de sílica, preveem o percentual de sílica adotados pelo modelo, porém, outro fator relevante para o modelo é o tempo, isto é, quando chegará o minério de ferro ao porto. Para isso, é necessária a análise das variáveis operacionais para o cálculo do tempo, em horas. São vinculados a fim de se calcular o erro absoluto entre o resultado do modelo e o resultado da análise química do minério empilhado no porto do Açú.

3.6. Variáveis críticas de processo, com impacto no modelo - Cálculo do tempo

O modelo estatístico de média móvel proposto utiliza no seu cálculo a análise das variáveis de processo que interferem no tempo e no cálculo deste, isto é, não basta conhecer o percentual de sílica, é fundamental a estimativa do tempo entre a saída do minério da mina até ao seu empilhamento no porto. A saber, foram divididos em duas categorias de variáveis, as variáveis de transporte do mineroduto e as variáveis de processo no desaguamento, etapa a realizar no porto do Açú, no terminal de logística.

As variáveis de transporte são todas as variáveis que se relacionam com o transporte da polpa de minério no mineroduto até à chegada à estação de

desaguamento, a filtragem. As variáveis críticas analisadas no transporte da polpa de minério de ferro são:

- a- Caudal do mineroduto: Medidor de caudal localizado no mineroduto indica o caudal instantâneo, resultante do bombeio da polpa através de bombas localizadas nas estações de bombas 1 e 2 (EB1 e EB2). O caudal médio, valor de projeto é 1850 m³/h. O caudal é enviado para o sistema PIMS, onde é registado o histórico temporal desta variável. Para o modelo, foi utilizado o caudal médio horário, em m³/h.
- b- Volume do mineroduto: O volume do minério é de 157 633 m³, este valor é fixo, visto que a estrutura não sofre qualquer alteração no tempo de transporte. Este volume corresponde ao volume interno do duto de aço especial de 26 polegadas de diâmetro externo em m³.
- c- Tempo médio de transporte entre a mina e o porto: O tempo médio utilizado no modelo foi calculado através da razão do volume, valor fixo em 157 633 m³ e o caudal médio horário, m³/h. O modelo utiliza o tempo médio horário em horas.

O processo de filtragem ou desaguamento tem início no término do bombeio da polpa de minério de ferro, localizado no porto do Açú, em São João da Barra, no Rio de Janeiro, quando esta é direcionada preferencialmente para o espessador de concentrado. O objetivo desta etapa é aumentar o percentual de sólido da polpa. A densidade de alimentação do *overflow* do espessador é de aproximadamente 2,20 t/m³, sendo a densidade de saída, no *under* do espessador, em torno de 2,55 t/m³, que são enviadas através de bombas centrífugas até os tanques de armazenagem.

Na filtragem, há quatro tanques de 5000 m³ de volume que recebem a polpa de minério e armazenam até que sejam bombeadas para a etapa de filtragem, que é realizada em filtros cerâmicos, e que através do processo de capilaridade e bomba de vácuo realizam a separação da água em excesso do minério de ferro, a ter como produto o minério de ferro com umidade entre 8 e 10 %.

As variáveis de processo relativas ao processo de desaguamento e filtragem utilizadas no modelo estatístico de média móvel foram:

- a- Volume do Espessador: O volume do espessador de concentrado contruído de betão armado é de 5000 m³, este valor é fixo.
- b- Caudal das bombas de *underflow* do espessador de concentrado: Medidor de caudal localizado na saída das bombas de *underflow* indica o caudal instantâneo, resultante do bombeio da polpa através de bombas centrífugas. O caudal médio varia de acordo com o mineroduto, como espessador não é tanque de armazenagem, o caudal de cada bomba é o caudal do mineroduto dividido por dois, pois são duas bombas idênticas a funcionar em simultâneo. O valor de projeto para o caudal do mineroduto é 1850 m³/h, o caudal aproximado é de 925 m³/h, o que corresponde a metade do caudal do mineroduto. O caudal é enviado para o sistema PIMS, onde é registado o histórico temporal desta variável. Para o modelo, foi utilizado o caudal médio horário, em m³/h.
- c- Nível dos tanques de armazenagem de polpa: O nível dos tanques é dado por medidores de níveis que informam em tempo real o

percentual dos tanques. A unidade de filtragem do Minas-Rio possui quatro tanques de 5000 m³ cada. O percentual dos níveis dos tanques é enviado para o sistema PIMS, onde é registado o histórico temporal desta variável.

d- Produção da Filtragem: A produção de minério de ferro é totalizada em balanças que medem o produto dos filtros cerâmicos, os valores são medidos de forma instantânea e totalizados de hora em hora, em toneladas, no sistema PIMS.

Contudo, a expressão matemática para o cálculo do tempo (T) é a somatória do tempo de transporte em mineroduto (TT) e do tempo de filtragem (TF). O cálculo do tempo é horário pois definirá a hora de chega da média móvel, na hora x_5 . A cada hora analisam-se as condições operacionais do modelo e as variáveis de impacto no tempo, e é calculado o tempo previsto de chegada.

O tempo total, T, em horas é dado pelo somatório do tempo de transporte do minério no mineroduto, TT, e o tempo de filtragem, TF.

$$T = TT + TF$$

Equação 2 - Tempo total de chegada ao porto.

O tempo de transporte em mineroduto, TT, é dado pelo volume em (v), que é o volume interno do mineroduto, a dividir pelo caudal das bombas do mineroduto em m³/h (Q). O tempo de transporte da polpa por toda a extensão do mineroduto em horas é calculado pela expressão a seguir:

$$TT = \frac{v}{Q}$$

Equação 3 - Tempo de transporte do mineroduto.

O volume interno do mineroduto é um valor fixo, o duto é de aço carbono, com 157.633 m³, portanto a cada hora é calculado o valor de TT, ao dividir o volume (v), pela média do caudal das bombas que impulsionam a polpa no interior do duto. A cada hora temos um tempo de transporte em mineroduto (TT), que é integrado em ficheiro de Excel, a ter o número de horas do transporte da mina ao porto.

O caudal do mineroduto é uma variável extraída do sistema informático, PIMS e o volume é dado de projeto (Anglo American Brasil, 2021). Portanto para cada elemento da média móvel, na posição x_5 , tem-se o calculo em horas de transporte da polpa por todo mineroduto. Ao variar o caudal das bombas, que pode ser entre valores de 1800 a 2000 m³/h. O caudal do mineroduto é variável crítica do processo, pois o caudal pode ter influência em vários fatores, como desgaste prematuro do duto, ou deposito de material no interior do duto.

Saber o tempo de transporte em mineroduto não responde integralmente a todas as questões necessárias para o modelo referente a este tema, e é necessário também conhecer o tempo até o empilhamento (TF), pois o minério, ao chegar na estação terminal, no porto Açú, passa pelo espessadores, tanques e filtragem. Sendo, então, necessário calcular o tempo de Filtragem (TF) que, somado ao tempo de transporte do mineroduto (TT), dá o tempo total (T) em horas.

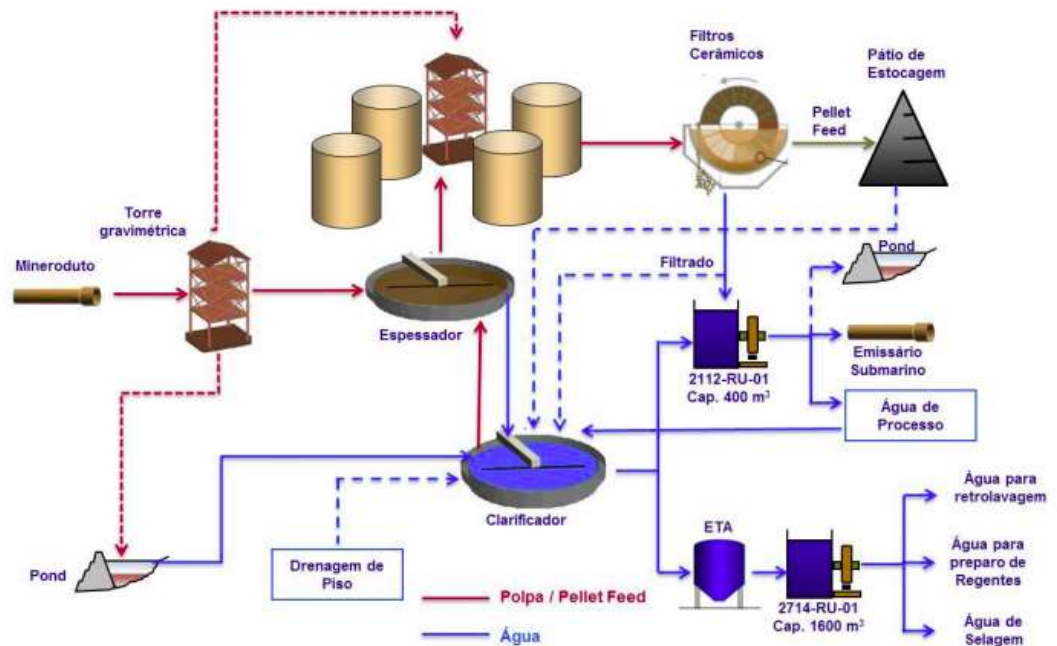


Figura 12 - Fluxograma do processo da Filtragem de São João da Barra . (Anglo American Brasil, 2021)

Para o cálculo do tempo de todo o processo de desaguamento realizado na filtração do porto do Açú, é necessário calcular o tempo de filtração (TF), somando-se o tempo de espessador (TE) e o tempo de transformação de filtração (TFT), em horas.

$$TF = TE + TFT$$

Equação 4 - Tempo de filtração.

No espessador de concentrado ocorrem as etapas de separação sólido/líquido de espessamento e filtração. Em operação normal, a polpa proveniente do mineroduto é direcionada para um espessador de 50 metros de

diâmetro, cuja função é aumentar o percentual de sólidos de 68 % para 72 %. O *underflow* desse espessador, quando atinge essa concentração de sólidos, é então direcionado para os quatro tanques de homogeneização e estoque de polpa (Junior, 2014). O tempo de espessador (TE) é calculado pelo volume do espessador (vE), 5000 m³, a dividir pelo caudal das bombas de polpa no *underflow* (Q_e) do espessador para os tanques da próxima etapa.

$$TE = \frac{vE}{Q_e}$$

Equação 5 - Tempo de espessador

O cálculo do tempo de espessador, e somado então com o tempo de transformação de filtragem (TFT) dado pela expressão:

$$TFT = \frac{NT \cdot \%S}{M} \cdot 100$$

Equação 6 - Tempo de transformação de filtragem.

Onde:

NT – Nível médio percentual útil dos tanques;

%S - Percentagem de sólidos;

M - Massa de minério seca horária, em toneladas por horas .

No cálculo do tempo de transformação de filtração - TFT, o nível dos tanques, dado pela expressão NT% é considerado somente o volume útil, descontam-se da somatória 40 %, o equivalente a 10 % de área morta em cada um dos quatro tanques da filtração. O modelo considera o somatório percentual dos quatro tanques, e desconta-se o valor de 40 % (quarenta por cento), que é distância entre a base (fundo) do tanque e a sucção da bomba centrífuga que envia para a filtração, a próxima etapa do processo.

Nos tanques, é armazenado o minério com água – denominado polpa, é necessário que após o cálculo do nível dos tanques, seja possível calcular a massa de minério. Para isso, é necessário utilizar o percentual de sólido (%S) através da expressão da Equação de Wills, que permite calcular a massa de sólidos presente em polpas de minério (Wills, 2006) em função da densidade (d_s) dos sólidos e da densidade de polpa (d_p), ou massa volúmica, na qual estão contidos esses sólidos. Assim, para a densidade da água igual a 1000 kg/m³, tem-se:

$$(\%S) = 100 * (d_s (d_p - 1.000) / d_p (d_s - 1.000))$$

Equação 7 - Percentagem de sólidos.

A densidade da polpa, ou massa volúmica (d_s) é dada pelo resultado da análise do densímetro radioativo, localizado nas saídas das bombas de *underflow* do espessador, antes de alimentar os tanques de armazenagem da filtração. A densidade do sólido (d_s) é medida em análise de laboratório, com base no minério extraído da mina. Esses valores são horários, e fazem parte dos

dados do banco de dados informático, que são analisados e calculas através do ficheiro em Excel.

Para que a massa total seja calculada, o valor da massa dos tanques de minério (numeradores da equação 6) é dividido pela média horária da produção dos filtros cerâmicos (em t/h), medido em balanças localizadas nas correias transportadoras (M) que encaminham para o pátio de *stock* de matéria prima, onde é empilhado em pilhas cónicas. A massa de minério a saída dos filtros (M) possui humidade, e a massa da água é suprimida do cálculo. Portanto, a massa M (denominador da equação 6) é de minério seco em toneladas. Para o calculo final de TFT multiplica-se os resultados por 100.

O cálculo do tempo em horas do Tempo Total da Chegada ao Porto (T) é então feito a gerar um número inteiro que indicará em que momento a polpa chegará ao porto do Açú. Portanto, é possível apontar e medir e comparar a média móvel no momento x_5 , e calcular a previsão temporal do empilhamento do minério de ferro através das variáveis descritas nas fórmulas e obter um número inteiro de T, que é a previsão horária da chegada do minério ao pátio, empilhado.

O modelo utiliza resultados de análises coletados em todo o processo, essas análises são químicas e físicas. A análise química é feita no mineroduto, à entrada da polpa, e na filtragem, no momento do empilhamento do minério de ferro. Às amostras coletadas são realizados testes por raio-x e espectrofotómetro, nos quais cada elemento químico presente na amostra é mensurado, sendo o seu resultado dado em percentual. Através desta amostra é possível conhecer o percentual de ferro, sílica, alumina e todos os elementos

químicos presentes. Essas amostras na entrada do mineroduto e do empilhamento são utilizadas pelo modelo de diferentes formas. A primeira, no mineroduto, é a base do modelo estatístico a gerar a média móvel que será comparada com o resultado do empilhamento, no final do processo, com a correção de tempo calculada através das variáveis de processo que influem neste.

Análises químicas apenas não são suficientes para o modelo, são necessárias também análises físicas do minério, como massa específica do minério, que é feita na amostra na mina e o resultado é em t/m^3 . Na filtragem, é feito o teste de humidade, em percentual. Esses valores são analisados pelo modelo, no cálculo do tempo de todo o processo de desaguamento na filtragem.

Em suma temos dados a entrada/ do mineroduto que foram base para o modelo de variabilidade do percentual de sílica que foram comparados com dados reais de empilhamento. E a diferença entre os dados do modelo e o valor empilhado foi medida o erro absoluto e somatória dos erros para que o modelo fosse considerado eficaz ou não.

3.7. Modelo estatístico com ajustamento das variáveis de processo

O modelo estatístico adotado neste trabalho foi o de média móvel simples de nove termos, onde a média é realizada pelo termo central, mais quatro amostras à frente e quatro amostras atrás. Como o tempo médio de

transporte é em torno de 85 horas, a depender do caudal das bombas do mineroduto e a produção da filtragem, o modelo proposto analisa as primeiras horas de bombeio e horas após bombeio para criar a tendência por média móvel, a media móvel de nove termos termo central, mais quatros horas e menos quatro horas do x_5 .

O processo é ininterrupto e permite usar termos obtidos horas antes e depois do bombeio. As paragens ocorrem apenas de forma programada e acidental, em caso de quebra de equipamento, permitindo assim esta metodologia.

O tempo é a circunstância fundamental do modelo, a análise das informações e das variáveis de processo foram feitas de forma a ter o tempo correto do empilhamento. O cerne do trabalho deu-se em calcular o tempo estimado tendo em vista o complexo processo, principalmente na unidade de desaguamento, filtragem e todo o longo transporte feito pelo mineroduto.

O primeiro passo do trabalho foi colocar na mesma linha de tempo todos os dados para que a análise temporal fosse possível. O tempo longo de bombeio e as variáveis operacionais foram dispostas a formar, com o auxílio do programa informático Excel.

Variabilidade da qualidade química das impurezas no processo de desaguamento da polpa de minério de ferro da Anglo American Brasil

Dados Entrada				Observação	
Volume Secção 1	m ³	Fixo	-	78816,50	Aguarda Alvarenga
Volume Secção 2	m ³	Fixo	-	78816,50	Aguarda Alvarenga
Volume Total	m ³	Fixo	-	157633,00	Aguarda Alvarenga
Sílica	%	Variável	Laboratório		Resultado da hora 1 Laboratório
Alumina	%	Variável	Laboratório		Resultado hora 1 Laboratório
Média caudal Nominal	m ³ /h	Variável	Medidor de caudal	1911,30	média da caudal "chegada ETM"
Densidade- massa volúmica - ETM	t/m ³	Variável	Densímetro	2,20	Resultado médio após a chegada
Sólido	%	Variável	Cálculo	0,68	-
Chegada ETM	h	Variável	Cálculo	82,47	-
Volume Espesador	m ³	Fixo	-	5000,00	-
Densidade média under espesador	t/m ³	Variável	Densímetro	2,50	Média da densidade "Tempo de retenção do espesador"
P. específico Minério	t	Fixo	-	5,10	-
Sólido	%	Variável	Cálculo	0,75	-
Caudal das bombas de under do Espesador	m ³ /h	Variável	Medidor de caudal	1649,90	Média da caudal "Tempo de retenção do espesador"
Tempo de retenção do espesador	h	Variável	Cálculo	3,03	-
Volume Tanque	-	Fixo	-	5000,00	
Número de tanque	m ³	Fixo	-	4,00	
Nível médio dos tanques	%	Variável	Medidor de nível	44,36	
Produção de minério	t/h	Variável	Balança	3300,00	
Umidade	%	Variável	Laboratório	10,00	
Massa minério + umidade / Balança	t	Variável	Cálculo	3630,00	
Densidade média Tanques	t/m ³	Variável	Calculo PI	2,50	
Sílica	%	Variável	Laboratório		Resultado da hora 1 Laboratório
Alumina	%	Variável	Laboratório		Resultado hora 1 Laboratório
Massa dos tanques	t	Variável	Calculo PI	5545,09	
Tempo Tancagem e Filtragem	h	Variável		1,53	
Tempo de EB1 a Empilhamento	h	Variável	Cálculo	87,03	

Tabela 3 - Tabela de dados Excel.

Posteriormente foi calculado o tempo de bombeio do mineroduto. Neste cálculo, foram usadas as variáveis de processo como caudal do mineroduto e volume interno do duto. A análise química realizada antes do bombeio é fundamental, pois nela se baseia todo o modelo de média móvel, média esta que será analisada com o resultado do empilhamento.

Saber o resultado da média móvel e a definição dos termos necessários para construção dela é fundamental, pois o número de termos é o que define a severidade da correção do modelo, isto é, poucos termos, a curva é mais agressiva, com menos termos, a curva é mais suave. Portanto, no caso do estudo, o melhor resultado foi com 9 termos, com quatro termos antes e quatro termos depois do termo central.

Ao definir a média móvel foi necessário calcular o tempo de processamento do minério não somente no mineroduto, mas também em todos os processos críticos da unidade de desagamento localizada no complexo portuária do Açú. Foi calculado o tempo de processamento do espessador de concentrado, tanques de homogeneização e produção nos filtros cerâmicos.

Para o espessador, sabe-se o volume, 5000 m³, e também o caudal das bombas de *underflow* do espessador, informação esta obtida no PIMS, calcula-se então o tempo de retenção do espessador, a saber que massa que entra é igual à massa que sai. Há densímetros que medem a densidade na entrada e saída do espessador.

Para os tanques, sabe-se a densidade de alimentação e o seu nível percentual, a conhecer então a massa de minério. Na filtragem, há uma balança que mede o minério produzido, e o tempo de processamento do minério nos tanques de armazenagem e na filtragem foi calculado com base nas variáveis de processo., No final, a conhecer o tempo total de mineroduto, espessador, tanques e filtragem tem-se o tempo total.

O modelo ajusta-se as condições operacionais de momento, tendo o seu resultado acompanhar as flutuações de processo devido a perturbações que porventura possam existir.

4. Apresentação dos resultados

4.1. Resultado do modelo proposto com série temporal atual

O modelo proposto com 9 termos foi feito para os dados nos meses de janeiro e fevereiro de 2021, com amostras horárias. No mês de janeiro de 2021, quando comparado o resultado da média móvel com o resultado do empilhamento, não há desprendimento acentuado entre o resultado do modelo de média móvel (em azul no gráfico) e o resultado medido no empilhamento (em laranja no gráfico) ao analisar todos os dias do mês de janeiro.

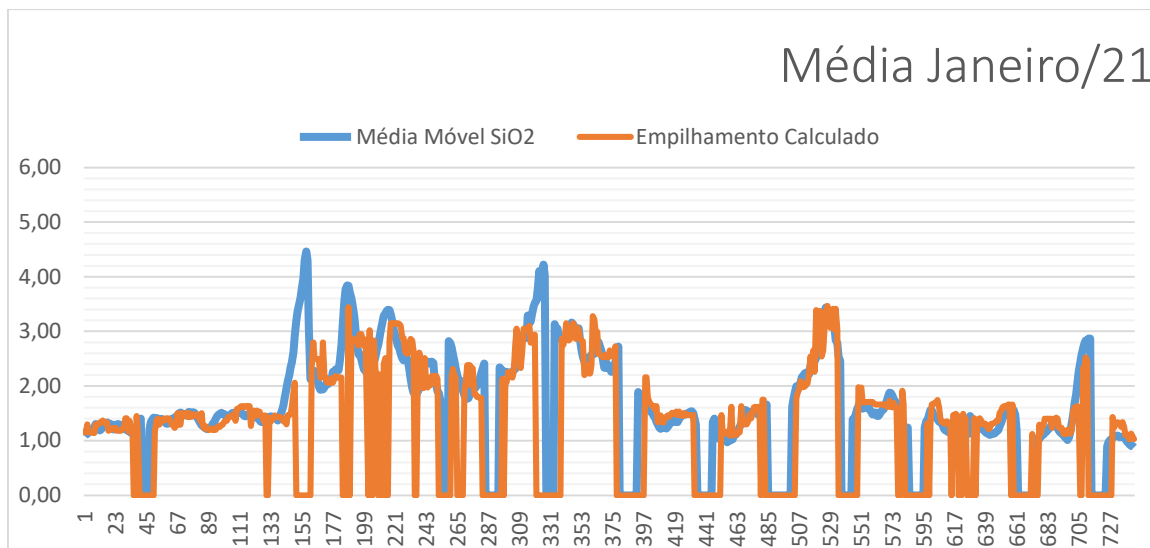


Gráfico 3 - Média janeiro/21

A considerar que o mês de janeiro tem 31 dias, portanto 744 horas corridas. A hora 1 corresponde a 01 de janeiro de 2021. Percebe-se que o modelo de média móvel de nove termos acompanhou o resultado do minério

empilhado, graficamente estável e sem grandes diferenças quando no processo não houve perturbações severas.

No mês de fevereiro, o comportamento foi semelhante ao do mês de janeiro, não havendo diferenças severas.

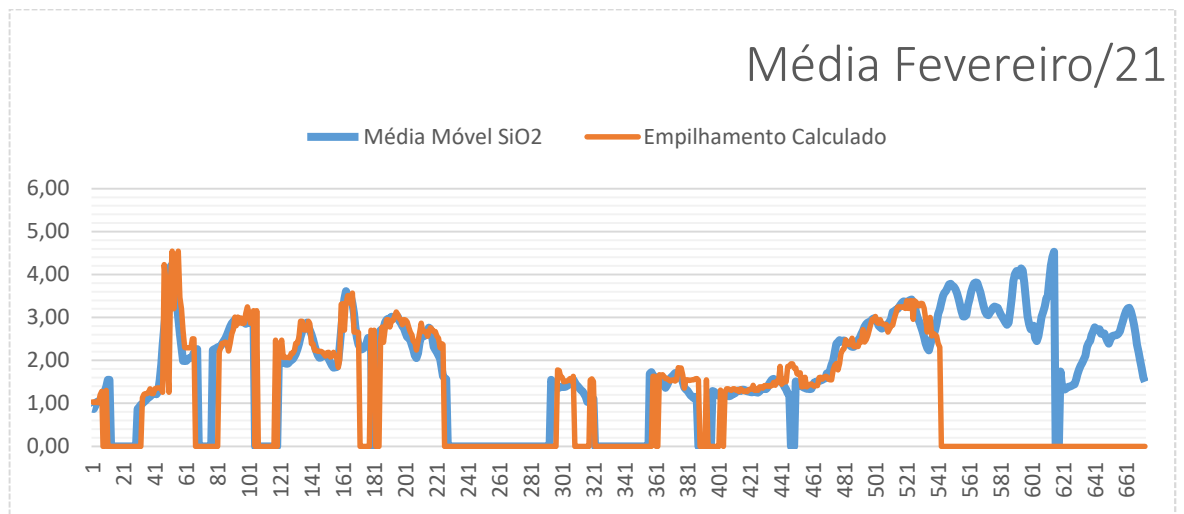


Gráfico 4 - Média fevereiro/21

As linhas de média móvel e empilhamento calculado quando estão no zero, no eixo das ordenadas (Y) no gráfico, representam parada do mineroduto e da filtragem. Quando somente um dos gráficos está no zero dos eixos da ordenadas, é em função de paradas operacionais emergenciais ou programadas. Observa-se, porém, que no mês de janeiro houve um número maior de paradas operacionais e no mês de fevereiro houve parada com maior tempo, porém em menor quantidade. A aderência entre o resultado do modelo e o resultado empilhado é menor nos momentos de instabilidade operacional, em caso de interrupção. No fim do mês de fevereiro, a filtragem estava parada e a estação de bomba continuou a operar.

Os dados analisados permitem afirmar que o modelo proposto no trabalho é robusto desde que não haja paragens, nem interrupções. Desta forma, quando houver, é necessário aguardar um período de tempo para que o modelo seja mais preciso.

4.2. Apresentação de possíveis erros e desvios

Para o trabalho, o erro calculado foi o absoluto, o cálculo feito entre o valor da média móvel nove termos, e o resultado do empilhamento na mesma linha do tempo. A comparar o resultado, o valor do erro no mês de janeiro foi de 0,18 %, e nos mês de fevereiro foi de 0,13 %. Isto é, ao analisar todos os resultados do mês de janeiro da média móvel calculada e comparar com o resultado empilhado das 744 horas no mês de janeiro e de 672 horas no mês de fevereiro, a diferença média foi de 0,18 % em janeiro e 0,13 % em fevereiro. Na somatória do erro absoluto observou-se que no mês de janeiro o valor foi de 102,12 % e de fevereiro foi de 67,63 %.

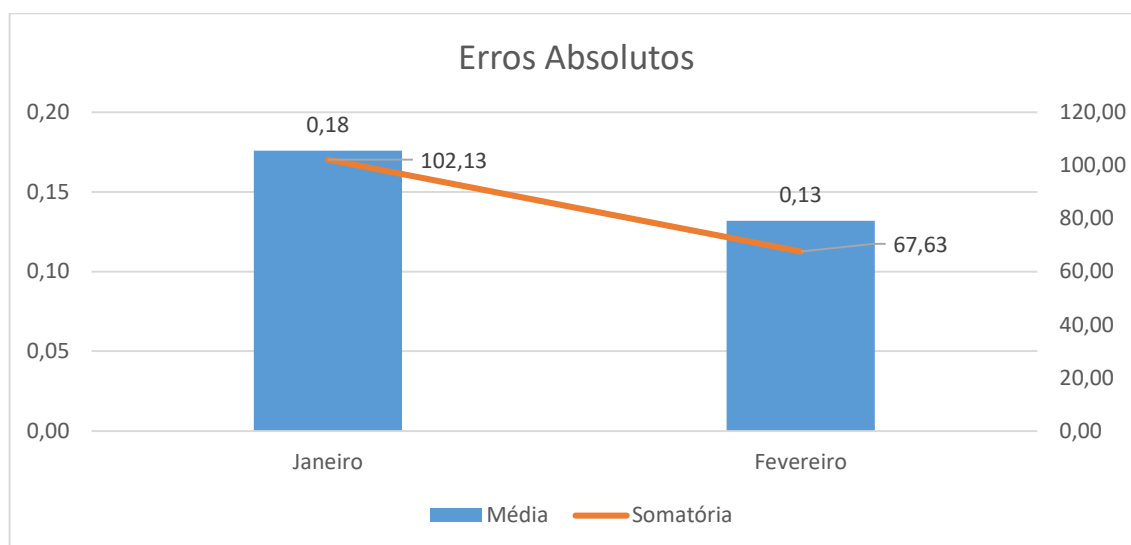


Gráfico 5 - Erro Absoluto da média móvel em relação ao empilhamento. Janeiro/21 e Fevereiro/21.

Uma ferramenta importante para análises das ocorrências é o diagrama de Pareto, nele é possível ter de forma gráfica colunas que ordena as frequências das ocorrências, da maior para a menor, permitindo no caso estudado, o erro absoluto entre o modelo de média móvel de sílica e o resultado do empilhamento no porto na mesma linha do tempo, percebe-se que mais de 90 % dos dados estão com erro absoluto menor que 0,4 %, que o valor de erro absoluto máximo médio admitido neste trabalho.

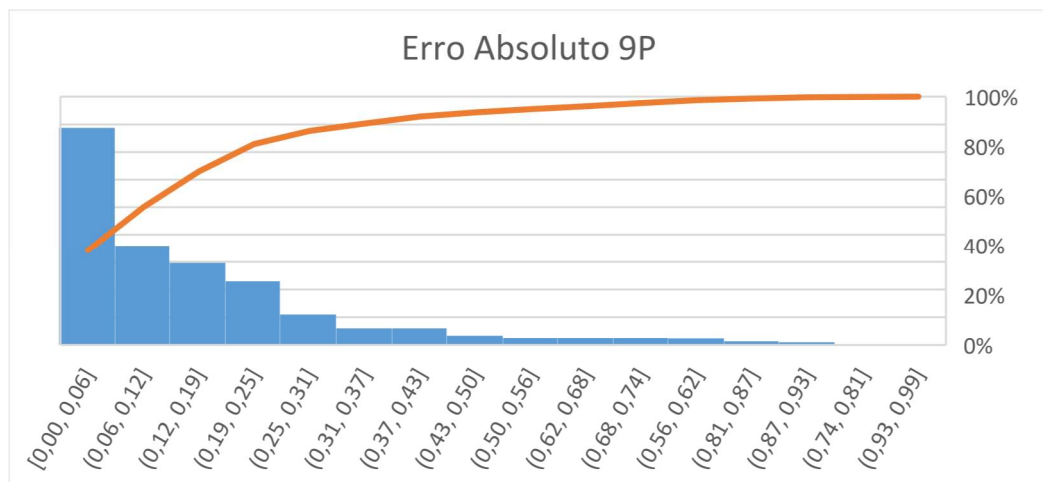


Gráfico 6 - Erro Absoluto 9P

A frequência que mais se repetiu no trabalho foi erro absoluto entre 0,00 e 0,06 % com quase quatrocentos resultados, seguido pela faixa de 0,06 e 0,12 % com mais de 150 resultados. Para o histograma, as paradas operacionais foram excluídas.

5. Conclusão e pareceres finais

O objetivo do trabalho é obter um modelo estatístico de média móvel, com erro absoluto de no máximo 0,4 % médio por período analisado, e este foi alcançado. Esses resultados são obtidos desde que não haja interrupções e as condições operacionais sejam conhecidas. A influência das paradas operacionais podem ser vistas na análise dos erros absolutos de janeiro e fevereiro de 2021. No mês de janeiro houveram maior quantidade de paradas operacionais que o mês de fevereiro, e isto reflete nos desvios absolutos, quanto mais paradas, maior distúrbio operacional e conseqüente maior erro absoluto.

O gráfico abaixo representa em detalhe o período entre 12 de janeiro às 10 h00 (274 das abcissas do gráfico de média janeiro de 2021) e 16 de janeiro às 12 h 00 (372 das abcissas do gráfico de média janeiro de 2021), e nele é possível perceber como a paragem do mineroduto influi no modelo de média móvel, a provocar distanciamento das linhas do modelo em azul, e do empilhamento em laranja. Quanto mais afastadas maior é o erro absoluto.

Variabilidade da qualidade química das impurezas no processo de desaguamento da polpa de minério de ferro da Anglo American Brasil

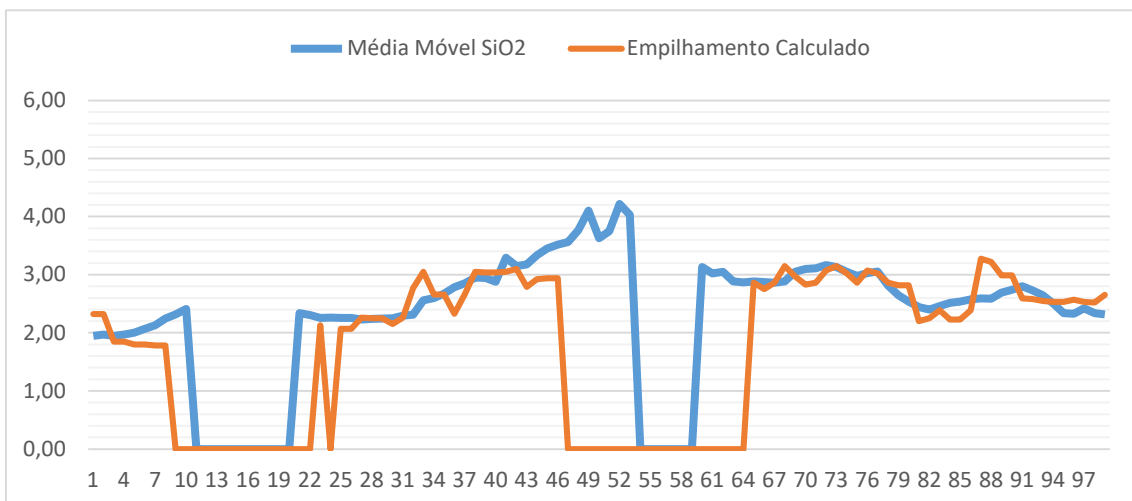


Gráfico 7 - Ampliação de período de paragem no mês de janeiro 21

Sugere-se que o modelo seja usado em condições operacionais estáveis, isto é, sem paragens, afim de diminuir o erro absoluto. Para trabalhos futuros podem ser estudados a diminuição dos erro nos tanques de armazenagem, visto que há um flutuação no nível e na ordem de abastecimento, que podem ser integrados ao cálculo para reduzir ainda mais o erro. Outra ação para futuro é estudo para conhecer o tempo necessário para estabilização após parada de mineroduto e filtragem.

A previsão do modelo de média móvel ajudará a equipa de operação e qualidade a conhecer a chegada do minério de ferro e o percentual de impureza, sendo a sílica a principal impureza no mineral, a garantir otimização logística, e entregas para clientes no porto e estabilidade operacional na filtragem e desaguamento.

A análise dos erros absolutos, bem como do modelo, permite afirmar que o modelo de média móvel com 9 termos é eficiente e consegue prever em torno de 81 horas antes, a depender do caudal das bombas do mineroduto.

Referências

- Andrade, A. L. (2018). *Idade do Ferro*.
- Anglo American. (2019). *Relatório a Sociedade*. Brasil.
- Anglo American Brasil. (22 de 03 de 2021). *Anglo American*. Obtido de Anglo American Brasil:
<https://twitter.com/angloamericanbr/status/1023933981430108160>
- Ballou, R. H. (2006). *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial*. Bookman.
- BNDES. (2010). *O Mercado Mundial de Minério de Ferro*.
- Brockwell, P., & Davis, R. (1991). *Time Series: Theory and Methods*. New York: Springer-Verlag.
- Caiado, J. (2002). *Métodos de previsão em Economia e Gestão: Desenvolvimentos recentes*. Inforbanca.
- Et, B. E. (1999). *A Typology of International Plant Networks: Empirical Study*.
- Gonçalves, J. (2010). *Gestão de Aprovisionamento – Stocks, Previsão e compras*. Publindústria, Edições Técnicas.
- IPEADATA. (2012).
- Junior, A. M. (2014). *INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA FILTRAGEM CERÂMICA DE POLPAS DE MINÉRIO DE FERRO*.
- Machado, M. A. (2012). *Modelos de previsão aplicados à otimização da gestão*. Lisboa: Universidade de Lisboa.
- Nogueira, F. (2019). *Modelagem e Simulação*. Universidade federal do Rio de Janeiro - UFRJ.
- Pais, J. P. (2017). *Métodos de Previsão*. Porto: Universidade do Porto.
- Peinado, J., & Graemi, A. R. (2007). *Administração da produção: operações industriais e de serviços*. Curitiba - Paraná - Brasil: UnicenP.

Santos, R. H. (12 de Junho de 2012). Flotação de minério de ferro. pp. 21-22.

Silva Martins, N. d. (Junho de 2012). Modelos autoregressivos e de médias móveis espaço-temporais (STARMA). *Modelos autoregressivos e de médias móveis espaço-temporais (STARMA)*.

Silva, E. M. (2019). *O Mercado mundial de Minério de Ferro e seus efeitos sobre a balança Comercial Brasileira*.

Wills, B. (2006). *Wills's mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*.

Xavier, J. M. (2016). *Análise e Previsão de Séries Temporais com Modelos Arima*.