



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LAIANNY CLEMENTE DE MENESES

**ESTUDO DE VARIÁVEIS QUE AFETAM A VIBRAÇÃO DO CORPO DE UM MOINHO
VERTICAL DE ROLOS**

RUSSAS

2023

LAIANNY CLEMENTE DE MENESES

ESTUDO DE VARIÁVEIS QUE AFETAM A VIBRAÇÃO DO CORPO DE UM MOINHO
VERTICAL DE ROLOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia mecânica
do Campus de Russas da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia mecânica.

Orientadora: Prof^a. Dra. Rosineide Fer-
nando da Paz

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M488e Meneses, Laianny Clemente de.
Estudo de variáveis que afetam a vibração do corpo de um moinho vertical de rolos. / Laianny Clemente de Meneses. – 2023.
67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2023.

Orientação: Profa. Dra. Rosineide Fernando da Paz.

1. Moinho vertical. 2. Vibração. 3. Variáveis. 4. Cimento. I. Título.

CDD 620.1

À minha família, por acreditar em mim e me apoiar. Em especial agradeço aos meus pais que me deram esperança para seguir e conforto, afirmando que não estou sozinha nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos, que nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo superior, entenderam que seria melhor para o meu futuro pois ele é construído do esforço que temos hoje.

A Prof^ª. Dra. Rosineide Fernando da Paz por me orientar em meu trabalho de conclusão de curso.

Ao projeto LTI (Laboratório de Tecnologias Inovadoras) pelo aprendizado a mim proporcionado e incentivo à análise de dados.

Agradeço a todos os professores por terem me proporcionado o conhecimento racional da engenharia, mas também um conhecimento de caráter pessoal sobre a educação que me auxiliou em minha formação profissional.

A Assistência Estudantil, por ter me proporcionado a oportunidade de ser bolsista do Auxílio Moradia, pois sem ele eu não teria condições financeiras de me mudar para Russas.

E aos amigos de sala, que me ajudaram no decorrer da minha formação superior, em especial a Bruna Rafaela por sempre me apoiar e incentivar.

“Ciclos são feitos de processos e a cada novo ciclo um novo processo é determinado para sermos aperfeiçoados.”

(Autor desconhecido)

RESUMO

A produção de cimento é uma das indústrias manufatureiras mais intensivas em energia, sendo que o circuito de moagem de cimento das fábricas consomem cerca de 4% da produção anual de energia elétrica global. Partindo disso, existem diversos tipos de moinhos aplicados na moagem de cimento, tendo como os principais o moinho de bolas e o moinho vertical de rolos. Os moinhos verticais são mais vantajosos devido utilizarem de 30% a 50% menos de energia do que os sistemas de moinhos de bolas e por possuírem um *layout* simples, reduzindo assim a quantidade de máquinas no circuito garantindo alto coeficiente de operação e baixos custos de manutenção. Em controvérsia, o moinho vertical de rolos é bastante sensível a variações repentinas no processo, causando assim altos índices de vibração no corpo do moinho gerando trincas nas soldas, quebra das capas dos rolos, desgaste acentuado na mesa de moagem, e entre outros problemas. Posto isto, o objetivo central do trabalho é analisar as variáveis que mais contribuem para a vibração do corpo de um moinho vertical de rolos destinado a moagem de cimento em uma planta cimenteira. Assim, foi realizado a coleta de dados referente à 10 meses de operação de um moinho vertical e em seguida integrado os dados dispersos, excluindo os *outliers*, valores vazios e variáveis que não estão relacionadas ao alvo. Os métodos utilizados para realizar a análise dos dados foram a regressão linear múltipla, a média móvel e o *Lag* ou *delay*. Sob isso, os resultados mostraram que a relação entre as variáveis não são lineares, sendo necessário um modelo diferente que consiga captar tais relações. Também nota-se na análise algumas correlações espúrias devido a interferência do operador(a) do centro de comando no aumento e redução de produtividade, afetando o comportamento da variável resposta. Assim, uma nova análise foi realizada mantendo-se um *range* de alimentação total quase constante, para evitar as interferências do operador(a) do painel de controle, revelando assim um modelo mais bem ajustado. Entretanto, há melhorias a serem realizadas com a utilização de um modelo que consiga assimilar as relações não lineares entre as variáveis explicativas e a resposta. Estas análises não foram realizadas neste estudo, devido a falta de tempo hábil, e serão deixadas aqui como trabalhos futuros.

Palavras-chave: vibração; variáveis; moinho vertical; cimento.

ABSTRACT

Cement production is one of the most energy-intensive manufacturing industries, with the factories' cement grinding circuit consuming around 4% of global annual electrical energy production. Based on this, there are several types of mills used in cement grinding, the main ones being the ball mill and the vertical roller mill. Vertical mills are more advantageous because they use 30% to 50% less energy than ball mill systems and because they have a simple layout, thus reducing the number of machines in the circuit, guaranteeing a high coefficient of operation and low maintenance costs. Controversially, the vertical roller mill is very sensitive to sudden variations in the process, thus causing high rates of vibration in the mill body, generating cracks in the welds, breakage of the roller covers, severe wear on the grinding table, and other problems. That said, the central objective of the work is to analyze the variables that most contribute to the vibration of the body of a vertical roller mill intended for grinding cement in a cement plant. Thus, data collection was carried out for 10 months of operation of a vertical mill and then the scattered data was integrated, excluding outliers, empty values and variables that are not related to the target. The methods used to perform data analysis were multiple linear regression, moving average and Lag or delay. Therefore, the results showed that the relationship between the variables are not linear, requiring a different model that can capture such relationships. It is also noted in the analysis some spurious correlations due to the interference of the command center operator in the increase and reduction of productivity, thus affecting the behavior of the response variable. Therefore, a new analysis was carried out maintaining an almost constant total power supply range, to avoid interference from the control panel operator, thus revealing a better adjusted model. However, there are improvements to be made with the use of a model that can assimilate the non-linear relationships between the explanatory variables and the response. These analyzes were not carried out in this study, due to lack of time, and will be left here as future work.

Keywords: vibration; variables; vertical mill; cement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos envolvidos na produção do cimento Portland	20
Figura 2 – Empilhamento método Chevron	21
Figura 3 – Silo CF (<i>Controlled flow</i>).....	22
Figura 4 – Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.....	23
Figura 5 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).....	24
Figura 6 – Componentes de um moinho vertical.....	26
Figura 7 – Vibração do corpo do moinho vertical (μm).....	37
Figura 8 – Dosagem de clínquer na receita (t/h).....	38
Figura 9 – Dosagem de escória na receita (t/h).....	39
Figura 10 – Dosagem de gesso na receita (t/h).....	40
Figura 11 – Dosagem de calcário na receita (t/h).	41
Figura 12 – Pressão de moagem (MPa).....	42
Figura 13 – Injeção de água (L/h).....	43
Figura 14 – Rotação do classificador (rpm).	44
Figura 15 – Potência do acionamento da mesa (kW).....	45
Figura 16 – Temperatura de entrada do moinho ($^{\circ}C$).....	46
Figura 17 – Temperatura de saída do moinho ($^{\circ}C$).....	46
Figura 18 – Arraste/Exaustão dos gases ($\%DA01$).	47
Figura 19 – Recirculação dos gases ($\%DA02$).....	48
Figura 20 – Diferencial de pressão do moinho ($mbar$).....	49
Figura 21 – Diferencial de pressão do filtro ($mbar$).	50
Figura 22 – Histograma da variável resposta com e sem a aplicação do logaritmo.....	51
Figura 23 – Correlação entre a Vibração e cada variável explicativa para diferentes valores de lag e média móvel.	54
Figura 24 – Matriz de correlação para os dados antes e após o processamento com lags e média móvel.	59
Figura 25 – Gráfico de pontos para todas as variáveis de entrada versus a variável Vibração	61
Figura 26 – Gráfico para os valores observados e preditos de vibração, para a amostra de teste.....	64
Figura 27 – Correlação de Pearson entre a Vibração e cada variável explicativa.....	67

Figura 28 – Gráfico para os valores observados e preditos de vibração, para a amostra de teste, para dados com pouca variação de alimentação total..... 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites utilizados para primeira filtragem dos dados considerados para análise.	50
Tabela 2 – Valores máximos de correlação de Pearson, juntamente com a quantidade de amostras para a média móvel e valor de defasagem em lags.....	56
Tabela 3 – Valores máximos de correlação mutua, juntamente com a quantidade de amostras para a média móvel e valor de defasagem em lags.	58
Tabela 4 – Valores estimados para quantidade de amostras para a média móvel e valor de defasagem em lags.	60
Tabela 5 – Valores máximos de correlação de Pearson, juntamente com a quantidade de amostras para média móvel e valor de defasagem em lags com baixa variabilidade de alimentação total.....	65
Tabela 6 – Valores máximos de correlação mutua, juntamente com a quantidade de amostras para média móvel e valor de defasagem em lags com baixa variabilidade de alimentação total.	65
Tabela 7 – Valores estimados para quantidade de amostras para a média móvel e valor de defasagem em lags com baixa variabilidade de alimentação total.	66
Tabela 8 – Métricas de avaliação do modelo.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
FSC	<i>Fator de saturação do cálcio</i>
MS	<i>Módulo de sílica</i>
MA	<i>Módulo de alumínio</i>
CF	<i>Fluxo controlado</i>
FF	<i>Funil controlado</i>
PCA	<i>Portland Cement Association - Associação de Cimento Portland</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

\forall	Para todo
$^{\circ}C$	Graus Celsius
h	Hora
kW	Quilowatt
L	Litro
m	Metro
$mbar$	Milibar
MPa	Mega Pascal
rpm	Rotação por minuto
t	Tonelada
h	Hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
2.3	Justificativa	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1	Extração e armazenamento da matéria-prima	20
3.2	Moagem da matéria-prima e a sua homogeneização	21
3.3	Formação do clínquer	22
3.4	Moagem de cimento	23
4	TRABALHOS RELACIONADOS	27
4.1	<i>A data-driven decision-making framework for online control of vertical roller mill (ZHU YANGJIAN JI, 2020)</i>	27
4.2	<i>Modeling of energy consumption factors for an industrial cement vertical roller mill by SHAP-XGBoost: a "conscious lab" approach (FATAHI R., 2022)</i>	28
4.3	<i>Review on vertical roller mill in cement industry and its performance parameters (PAREEK, 2021)</i>	28
5	METODOLOGIA	30
5.1	Regressão linear múltipla	30
5.2	Média móvel	33
5.3	Lag	33
5.4	Tipos de cimento produzidos na planta considerada para coleta de dados	34
6	RESULTADOS	36
6.1	Séries de tempo para todas as variáveis sem aplicação de filtro	36
6.1.1	<i>Vibração do corpo do moinho</i>	36
6.1.2	<i>Dosagem de clínquer na receita do cimento</i>	37
6.1.3	<i>Dosagem de escória/clínquer B na receita do cimento</i>	38
6.1.4	<i>Dosagem de gesso na receita do cimento</i>	39
6.1.5	<i>Dosagem de calcário na receita do cimento</i>	40

6.1.6	<i>Pressão de moagem</i>	41
6.1.7	<i>Injeção de água</i>	42
6.1.8	<i>Rotação do classificador (rpm)</i>	43
6.1.9	<i>Potência do acionamento da mesa</i>	44
6.1.10	<i>Temperatura de entrada do moinho</i>	45
6.1.11	<i>Temperatura de saída do moinho</i>	46
6.1.12	<i>Arraste/Exaustão dos gases</i>	47
6.1.13	<i>Recirculação dos gases</i>	47
6.1.14	<i>Diferencial de pressão do moinho</i>	48
6.1.15	<i>Diferencial de pressão do filtro</i>	49
6.2	Variável Resposta	51
6.3	Análise de defasagem de tempo	51
6.4	Resultados apenas para o cimento CP II F - 32	52
6.4.1	<i>Transformação para variáveis composicionais</i>	56
6.4.2	<i>Análise das relações via correlação de Pearson</i>	57
6.4.3	<i>Análise das relações via gráficos de pontos</i>	59
6.4.4	<i>Predição com modelo linear</i>	63
6.4.5	<i>Análise para valores com baixa variabilidade de alimentação total</i>	64
7	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

A produção de cimento é uma das indústrias manufatureiras mais intensivas em consumo de energia, sendo que o circuito de moagem da cimento das fábricas consomem cerca de 4% da produção anual de energia elétrica global (FATAHI R., 2022). É bem entendido que modelar e digitalizar processos em escala industrial ajudaria a controlar melhor os circuitos de produção, melhorar a eficiência, aprimorar os sistemas de treinamento pessoal e diminuir o consumo de energia das fábricas. Para isso, diversas indústrias cimenteiras estão optando pelo moinho vertical de rolos como equipamento central de um sistema de moagem devido a sua multifuncionalidade, realizando os processos de de secagem, moagem e separação em uma única unidade, simplificando o *layout* da planta. Em controvérsia, o moinho vertical de rolos é bastante sensível a variações repentinas no processo, causando assim altos índices de vibração no corpo do moinho gerando trincas nas soldas, quebra das capas dos rolos, desgaste acentuado na mesa de moagem, e entre outros problemas.

A partir destas considerações, a vibração do corpo de um moinho de rolos vertical é um assunto de suma relevância à indústrias cimenteiras que possuem este equipamento em sua planta, pois sua estabilidade garante uma redução de energia no processo e redução nos custos de manutenção. Assim, faz-se necessário o conhecimento dos tipos de relações que as principais variáveis de controle operacional têm com a vibração do corpo do moinho de cimento, para garantir um bom funcionamento do equipamento e estabilidade na operação. Pois qualquer instabilidade no processo pode acarretar em um cimento fora das especificações de qualidade.

Dentro deste cenário, este trabalho analisa as influências que as principais variáveis de controle operacional possuem com a vibração do corpo do moinho. Para tal conhecimento dessas relações, foram coletados dados referentes a 10 meses de operação de um moinho vertical que produz cimento, sendo de outubro de 2022 à julho de 2023, e analisados utilizando-se três métodos: a regressão linear múltipla, visando estimar os parâmetros do modelo linear que melhor descrevem as relações entre as variáveis; a média móvel, para ajudar a identificar a tendência de um conjunto de dados que está disposto em uma série de tempo; *Lag* ou *delay*, que irá ajustar o banco de dados de acordo com o tempo de interferência entre as variáveis.

Após aplicação dos métodos, nota-se como principais resultados correlações espúrias, devido interferência do operador do centro de comando na manipulação da produtividade do moinho, afetando assim na variável Vibração. Assim, essas correlações não podem ser levados em consideração pois foi alterada devido uma terceira variável. Porém, realizando as análises

com um *range* de alimentação constante, é possível perceber que algumas correlações são mais realísticas. Também percebe-se ao utilizar o modelo, que o mesmo não está bem ajustado devido o relacionamento entre as variáveis explicativas e a variável resposta não ser linear, necessitando assim de um modelo de aprendizado profundo. Portanto, faz-se necessário realizar análises mantendo a alimentação do moinho constante, para evitar relações errôneas entre as variáveis, e a utilização de um modelo que consiga captar as relações não lineares entre as variáveis.

Partindo disso, o trabalho está organizado da seguinte maneira: o capítulo 2 descreve os objetivos e a justificativa do trabalho; o capítulo 3 descreve sobre o processo produtivo para fabricação do cimento Portland e sobre os moinhos verticais; o capítulo 4 descreve sobre os trabalhos associados a essa pesquisa; o capítulo 5 descreve os métodos utilizados para análise dos dados; o capítulo 6 descreve os principais resultados obtidos a partir das análises realizadas e finalmente o capítulo 7 faz uma breve conclusão acerca a relevância dessa pesquisa e quais são as recomendações para os trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Este capítulo mostra o principal objetivo do trabalho e os objetivos específicos. Além disso, também descreve-se as justificativas para realização deste trabalho.

2.1 Objetivo geral

Analisar as variáveis que mais contribuem para explicar a variável vibração do corpo de um moinho vertical de rolos para produção de cimento em uma planta cimenteira.

2.2 Objetivos específicos

- Montar base de dados para estudar a variável vibração.
- Ajustar um modelo de regressão a fim de obter uma previsão da variável Vibração.
- Apresentar resultados de uma análise inicial e exploratória dos dados.

2.3 Justificativa

Ao se operar um moinho de cimento com alta vibração, alguns problemas podem ocorrer, tais como:

- Trincas nos *stands* (estrutura em que se fixa os rolos de moagem).
- Destacamento das capas dos rolos.
- Desgaste acentuado da solda da mesa do moinho.
- Sobrecarga no acionamento da mesa do moinho (maior potência e corrente do motor).

As principais variáveis que podem influenciar na vibração do moinho em operação são listadas a seguir.

- Alimentação (t/h): o material já dosado nas balanças de acordo com o tipo de cimento que se deseja produzir é então direcionado para a calha de alimentação do moinho. Os materiais são clínquer, escória granulada de alto-forno, gesso e material carbonático.
- Arraste (%DA01): damper localizado antes do exaustor principal que controla a porcentagem de tiragem dos gases.
- Recirculação (%DA02): damper localizado após o exaustor que controla a porcentagem de gases que são reaproveitados no processo, esse valor deve ser ajustado de acordo com a pressão de entrada do moinho.

- Temperatura de entrada do moinho ($^{\circ}C$).
- Temperatura de saída do moinho ($^{\circ}C$).
- Potência do motor do acionamento da mesa do moinho (kW). A mesa do moinho é o local onde acontece a cominuição do material. A mesa é acionada, e ao realizar o movimento giratório, devido a ação da força centrífuga, o material é direcionado para a extremidade da mesa e assim os rolos realizam a compressão, realizando a moagem dos materiais.
- Diferencial de pressão do moinho ($mbar$): diferença entre a pressão de saída do moinho menos a pressão de entrada do moinho. A pressão de entrada se mantém fixa após o ajuste do arraste e recirculação dos gases, porém a pressão de saída tende a ficar cada mais negativa de acordo com o aumento da alimentação do moinho em razão de uma maior restrição no duto de saída do moinho pelo material moído (cimento).
- Diferencial de pressão do filtro de processo ($mbar$). O filtro de processo é um filtro de mangas onde ocorre a separação do cimento e dos gases. Esse valor corresponde a diferença de pressão entre as câmeras suja e limpa do filtro, indicando através desta diferença o grau de saturação das mangas, constituindo-se no principal item de monitoramento de condições do filtro.
- Pressão de moagem (MPa). A principal função consiste em aplicar uma pressão contra o leito de material na mesa do moinho durante a operação. A função secundária é atuar como um sistema amortecedor para movimentar os rolos visando acompanhar as variações sofridas na mesa de moagem. Durante a partida do motor, o sistema alivia a carga erguendo os rolos sobre o leito de moagem.
- Injeção de água (L/h). Entre os quatro rolos, há quatro bicos que injetam água em direção a mesa proporcionando uma maior estabilidade no leito de moagem.
- Rotação do separador (rpm). As partículas entram no separador integrado ao moinho, selecionando o produto acabado do produto grosso através das aletas de entrada fixas e aletas internas móveis. O produto de granulometria inadequada para tal tipo de cimento, retorna para o processo de moagem até atingir a finura ideal. Ao passar pelo classificador, o material já se encontra pronto. A rotação do separador muda de acordo com cada tipo de cimento.
- Espessura da camada de material na mesa (mm). É a altura de material formada entre o rolo e a mesa rotativa. Essa camada transmite toda a força do rolo e a potência do moinho.

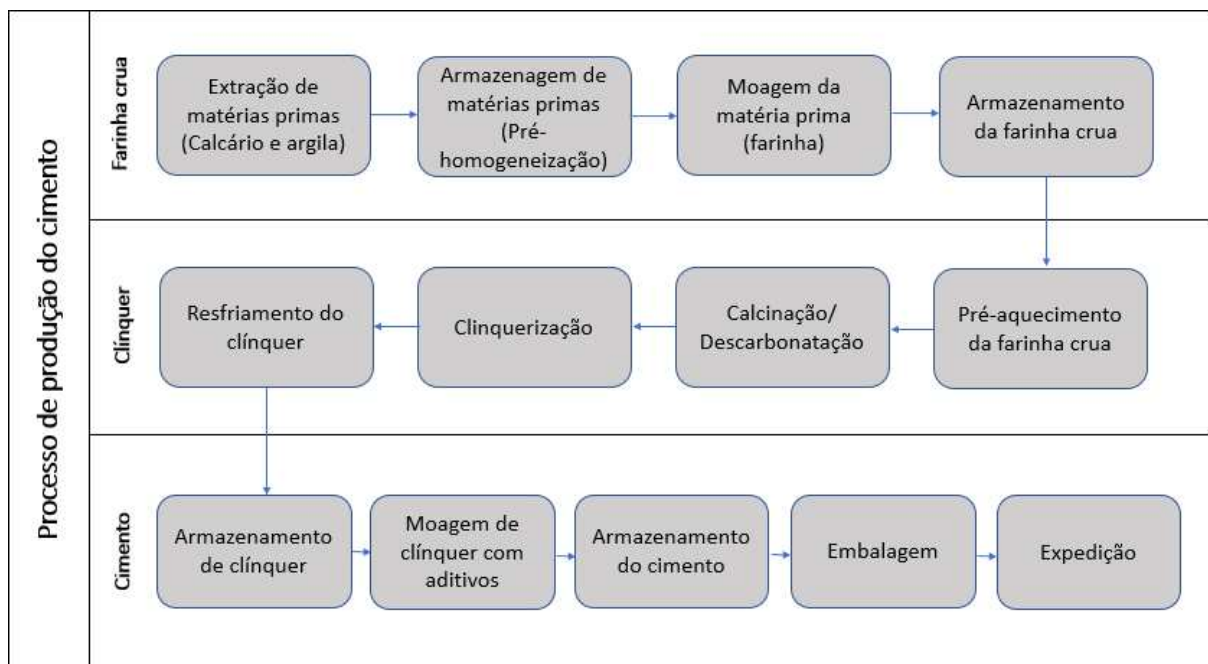
Posto isso, estudar os tipos de relações e influências que as principais variáveis

têm com a vibração do corpo do moinho de cimento é de suma importância para um bom funcionamento do equipamento e estabilidade da operação, já que nos moinhos verticais, qualquer instabilidade no processo acarreta em um cimento fora das especificações de qualidade.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O cimento tem como definição "um material que une corpos sólidos (agregados) por endurecimento a partir de um estado plástico. Ele funciona ao se formar uma pasta que desenvolve rigidez, aumentando constantemente a resistência a compressão por reação química com a água, chamado de hidratação (GERRY, 1999). A fabricação do cimento Portland no Brasil, acontece de acordo as especificações *Associação Brasileira de Normas Técnicas* (ABNT) (ITAMBE, 2002). Ademais, o processo produtivo adotado neste trabalho é o de via seca, em que a farinha moída que alimenta o forno é em forma de pó e totalmente seca, necessitando de uma menor quantidade de energia para a produção (RODRIGUES, 2013). Sendo assim, a Figura 1 explica as principais etapas desse processo produtivo.

Figura 1 – Processos envolvidos na produção do cimento Portland



Fonte: AUTORA (2023).

3.1 Extração e armazenamento da matéria-prima

Primeiramente, é extraído de pedreiras, em sua grande maioria a céu aberto, o mineral conhecido como calcário. A extração é feita através da detonação utilizando explosivos e em seguida a remoção do minério com escavadeiras. Logo depois, o material é transportado e inicia-se o método de cominuição, que é definido como a redução granulométrica de um material. Sendo assim, um dos primeiros estágios para isso é o processo da britagem, que

normalmente reduz pedras de 1 - 2 m até o tamanho desejado de acordo com a especificação do britador e da necessidade da empresa (VARELLA, 2011). Após esse processo de fragmentação, o material será armazenado, passando pelo empilhador uma mistura de calcário e argila, para que ocorra o fenômeno chamado de pré-homogeneização, em que visa amenizar efeitos das variadas composições químicas da matéria. Existem vários métodos de empilhamento da matéria prima. Sendo assim, a Figura 2 representa um exemplo de empilhamento conhecido como método Chevron, que empilha o material da esquerda para direita, sobre a linha central da pilha, em que o material fino concentra-se no centro da pilha e o material mais grosso mantém-se no fundo e superfície da pilha.

Figura 2 – Empilhamento método Chevron



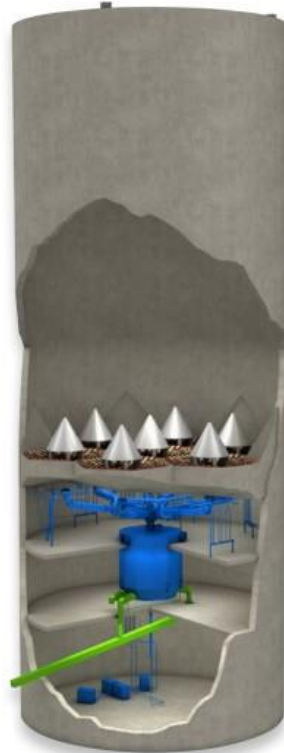
Fonte: Neto (2018).

3.2 Moagem da matéria-prima e a sua homogeneização

A pilha de calcário e argila, que também é conhecida como argical, por meio de retomadoras, é direcionado para um silo. Além disso, existem aditivos tais como a própria argila rica em sílica (SiO_2) e minério de ferro (Fe_2O_3), que são adicionadas ao argical para corrigir deficiências em prol do cumprimento dos parâmetros de qualidade da pilha, tais como *Fator de saturação do cálcio* (FSC), *Módulo de sílica* (MS) e *Módulo de alumínio* (MA). Com isso, essa mistura é transportada para moinhos que transformam o material em uma farinha, também chamada de cru. Assim, a farinha crua é então armazenada em um silo de homogeneização, podendo este ser de *Fluxo controlado* (CF) ou *Funil controlado* (FF). Desta maneira, o silo serve de pulmão para a alimentação contínua do forno e propicia através da aeração e extração uma mistura das diferentes composições químicas, tornando a farinha mais uniforme (FLSMIDTH,

2011).

Figura 3 – Silo CF
(Controlled flow)



Fonte: FLSmith (2011).

3.3 Formação do clínquer

Também conhecida como etapa de piroprocessamento, segundo a *Portland Cement Association - Associação de Cimento Portland (PCA)*:

A etapa de piroprocessamento é geralmente considerada como o coração do processo de fabricação de cimento. É a fase em que aparecem a maior parte dos custos operacionais da fabricação de cimento e, portanto, é também a fase em que existe a maior parte das oportunidades de melhoria do processo.

Segundo (ITAMBE, 2002), o clínquer é composto essencialmente por cálcio, sílica, alumínio e ferro, que reagem entre si dando origem aos seguintes compostos.

- 01) $3CaO.SiO_2$ -> Silicato tricálcico = (C_3S) 18 a 66% no cimento.
- 02) $2CaO.SiO_2$ -> Silicato dicálcico = (C_2S) 11 a 53% no cimento.
- 03) $3CaO.Al_2O_3$ -> Aluminato tricálcico = (C_3A) 05 a 20% no cimento.
- 04) $4CaO.Fe_2O_3.Al_2O_3$ -> Ferro aluminato tetracálcico = (C_4AF) 04 a 14% no cimento.

Nesta fase, existem muitos designs e aprimoramentos de sistemas de fornos diferentes, mas todos eles estão essencialmente realizando a seguinte transformação no material.

1. Evaporação de água livre, em temperaturas de até 100°C.
2. Remoção de água adsorvida em materiais argilosos 100°C - 300°C.
3. Remoção de água quimicamente ligada 450°C - 900°C.
4. Calcinação de materiais de carbonato 700°C - 850°C.
5. Formação de C_2S , aluminatos e ferritas 800°C - 1250°C.
6. Formação de fusão de fase líquida >1250°C.
7. Formação de C_3S 1330°C - 1450°C.
8. Resfriamento do clínquer para solidificar a fase líquida 1300°C - 1240°C.
9. Microestrutura final congelada em clínquer < 1200°C.
10. Clínquer arrefecido em refrigerador 1250°C - 100°C.

3.4 Moagem de cimento

O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento. A partir disso, a matéria prima é misturada com aditivos, tais como o gesso, calcário, escória ou pozolana, sendo eles dependentes do tipo de cimento que se deseja produzir. De acordo com a norma ABNT NBR 16697, a Figura 4 explica os tipos de cimento existentes e a Figura 5 mostra as composições do cimento.

Figura 4 – Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b –	
	Com adição	CP I-S			
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E			
	Com material carbonático	CP II-F			
	Com material pozolânico	CP II-Z			
Cimento Portland de alto-forno		CP III			
Cimento Portland pozolânico		CP IV			
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d		
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c		
	Não estrutural	CPB	–	–	

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^c As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: (ABNT, 2018).

Figura 5 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)

Designação normalizada		Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Cimento Portland comum		CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5			
		CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10	
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno		CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15	
Cimento Portland composto com material pozolânico		CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15	
Cimento Portland composto com material carbonático		CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25	
Cimento Portland de alto forno		CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10	
Cimento Portland pozolânico		CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10	
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V ^a			ARI	90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB			25, 32 ou 40	75 – 100	–	–	0 – 25
	Não estrutural				–	–	50 – 74	–	–

^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

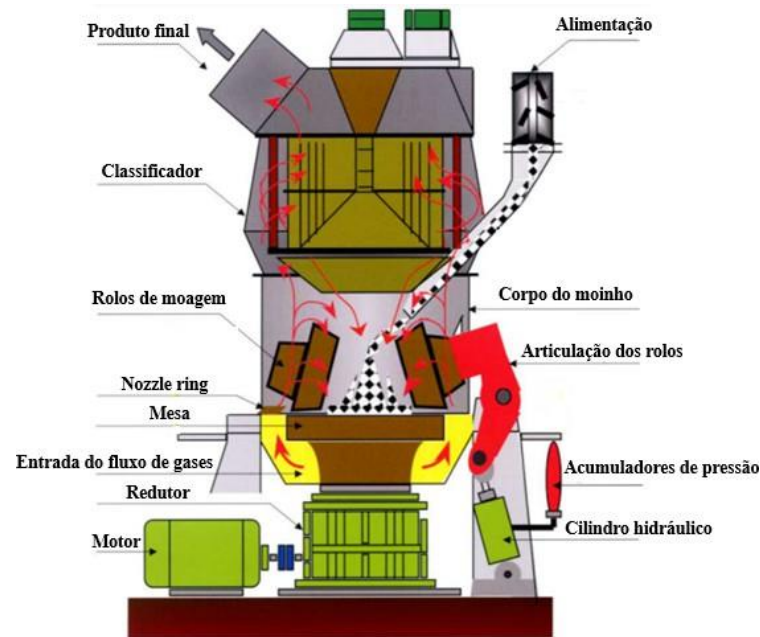
Fonte: (ABNT, 2018).

Partindo disso, existem diversos tipos de moinhos aplicados na moagem de cimento, tendo como os principais o moinho de bolas e o moinho vertical de rolos. De acordo com a *FLSmidth*, os moinhos verticais são mais vantajosos devido utilizarem de 30% a 50% menos de energia do que os sistemas de moinhos de bolas, possuem um *layout* simples e menor quantidade de máquinas no circuito garantindo alto coeficiente de operação e baixos custos de manutenção e uma excelente capacidade de secagem ao moer escória de alto-forno ou cimentos misturados com componentes úmidos (FLSMIDTH, 2015).

Sendo assim, a moagem de cimento que será analisada nesse trabalho é realizada por um moinho vertical de rolos modelo UBE 38.4 com quatro rolos inclinados a 15° sobre uma mesa rotativa com diâmetro de 3,8 m e rolos com diâmetro de 1,9 m. A matéria prima já dosada de acordo com o tipo de cimento que se deseja produzir é introduzida no centro da mesa do moinho por meio de uma calha de alimentação e é forçada para as extremidades da mesa devido a ação da força centrífuga produzida em função do acionamento de um motor elétrico que movimenta uma engrenagem de redução girando a mesa de moagem, o material fica retido na mesa pelo *dam ring*, que é um anel de contenção na borda da mesa que mantém um leito estável de material na mesa. Assim, o material é fragmentado pelos rolos que giram devido a força tangencial que o leito de material imprime sobre os mesmos. Os rolos moedores possuem um braço de articulação para que seja possível movimentá-los e ajustar a pressão de moagem, que pode ser regulada através de um aumento ou diminuição da pressão hidráulica dos cilindros,

dentro é claro, de determinados limites de projeto. Deste modo, a capacidade de produção de um moinho vertical de rolos depende diretamente da pressão exercida pelos rolos de moagem sobre o leito de material na mesa de moagem. Embora o sistema hidráulico tenha como função principal aplicar a pressão de moagem sobre a mesa, também exerce uma importante função secundária de atuar como um sistema amortecedor para que o movimento dos rolos possam acompanhar as variações do material na mesa. Cada cilindro hidráulico é conectado a um par de acumuladores de pressão que contém uma bexiga cheia de nitrogênio. Os acumuladores servem como reservatórios de energia para equalização de pressão e para amortecimento de choques e oscilações inerentes à aplicação da pressão hidráulica dos rolos sobre o leito de material na mesa. O material moído é então transportado por um fluxo de gases ascendentes à mesa que formam um vórtice devido as chapas conhecidas como *armor ring* que direcionam os gases para o centro da mesa e também devido a inclinação das aletas chamadas de *nozzle ring*, chapas inclinadas à 75°. Sendo assim, os gases quentes elevam-se dentro do corpo do moinho carregando consigo as partículas mais finas, que entram no separador ou classificador de alta eficiência integrado ao moinho, selecionando o produto acabado do produto grosso através das aletas de entrada fixas e aletas internas móveis, cujas inclinações são de 53° e rotação nominal das aletas móveis de 1750 rpm. O produto grosso, ou seja, de granulometria inadequada, retorna para o processo de moagem até atingir a finura ideal. Ao passar pelo classificador, o material já se encontra finalizado, passando assim por um filtro de mangas e em seguida armazenado em silos de acordo com cada tipo de cimento, estando assim pronto para ser expedido (NETO, 2018).

Figura 6 – Componentes de um moinho vertical.



Fonte: (UBE, 1980).

Entretanto, os moinhos verticais possuem uma desvantagem. Eles têm um controle de qualidade da matéria-prima mais inconsistente que o moinho de bolas, devendo assim para amenizar esses efeitos ter uma operação estável. Atualmente, a operação de um moinho vertical é realizada manualmente em um painel de controle, em que os operadores tomam decisões com base em sua observação e experiência visando os parâmetros de produtividade, qualidade e redução de vibração do corpo do moinho. Contudo, em sua maioria, estas tomadas de decisões e mudanças de parâmetros acarretam em aumento do índice de vibração, até que o processo seja reajustado. Assim, existem muitos trabalhos que visam otimizar a tomada de decisão na operação de um moinho vertical, devido os ganhos na eficiência energética quando se têm parâmetros bem ajustados.

4 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo são listados os trabalhos associados a essa pesquisa.

4.1 *A data-driven decision-making framework for online control of vertical roller mill (ZHU YANGJIAN JI, 2020)*

O artigo apresenta uma abordagem de tomada de decisão de controle operacional *online* orientada por dados treinados. Os dados reais são uma série não estacionária, processada com o *Autoregressive Integrated Moving Average Model (ARIMA)*. O modelo ARIMA pode ser expresso como ARIMA (p, d, q), onde p representa termo auto-regressivo, d representa termo integrado e q representa termo médio móvel, e ARIMA (p, d, q) transforma sequência não estacionária em sequência estacionária por d vezes em operação de diferenciação. Na operação em tempo real, o estado de destino é obtido comparando o estado em tempo real e a biblioteca treinada para uma operação estável, em seguida, a estratégia de controle correspondente, composta por indicadores chave e parâmetros controláveis ajusta os parâmetros de acordo com os dados treinados. Desta forma, um *framework* de malha fechada é formado com base na mineração de dados *offline* e na tomada de decisão *online*, suportando a otimização da operação do moinho.

Assim, esta abordagem é aplicada em uma fábrica de cimento como estudo de caso em Jiangsu, China, em que 12 variáveis foram retidas para estudo, sendo elas volume de alimentação, área de superfície específica (*blaine*), pressão de moagem, vibração do corpo do moinho, espessura da camada de material, pressão de entrada do moinho, temperatura de entrada do moinho, temperatura de saída do moinho, diferença de pressão do moinho, velocidade do separador, velocidade do exaustor principal e abertura da válvula de circulação de gás. Os resultados mostram que as variáveis que mais contribuem para a instabilidade de um moinho vertical são o diferencial de pressão do moinho, a espessura da camada de material no leito de moagem e a temperatura de saída do moinho. Estabilizando principalmente essas três variáveis, o valor médio da vibração melhorou de 8,321 *mm/s* para 7,174 *mm/s*, reduzido em 13,78%. No desempenho de longo prazo, nenhum desligamento devido a vibração anormal foi relatado em um mês. Assim, a estratégia de controle é eficaz em condições reais de trabalho e a operação contínua do equipamento com redução de vibração é alcançada.

4.2 *Modeling of energy consumption factors for an industrial cement vertical roller mill by SHAP-XGBoost: a "conscious lab" approach (FATAHI R., 2022)*

O trabalho evidencia que modelar e digitalizar processos em escala industrial ajuda a controlar melhor os circuitos de produção, melhorar a eficiência, aprimorar os sistemas de treinamento pessoal e diminuir o consumo de energia das fábricas. Essa abordagem é feita integrando o laboratório consciente (CL) como um conceito inovador. Conjuntos de dados robustos originados do monitoramento de variáveis operacionais nas plantas e traduzindo-os em informações de base humana usando modelos explicáveis de inteligência artificial conduziu uma nova estratégia para explorar as relações entre as variáveis operacionais monitoradas pelo moinho vertical e seus fatores representativos de consumo de energia (temperatura de saída do moinho e potência do motor no acionamento da mesa). O autor utiliza o *SHAP-XGBoost*, como um dos sistemas de inteligência artificial explicável mais recentemente desenvolvidos para desenvolver um laboratório consciente.

Deste modo, este trabalho utiliza como variáveis de monitoramento a taxa de alimentação do moinho, pressão de moagem, fluxo de gás na entrada do moinho, velocidade do classificador, vibração do corpo do moinho, temperatura de entrada do moinho, diferencial de pressão, pressão de entrada no moinho, temperatura de saída e potência do motor do acionamento da mesa. Em seus resultados, a avaliação *SHAP* indicou que a pressão de trabalho e o fluxo de gás de entrada tiveram a maior eficácia (correlações positivas) na temperatura de saída e na potência do motor, respectivamente. A correlação de *Pearson* e o *SHAP* podem destacar uma intercorrelação negativa entre a velocidade do classificador e a pressão de trabalho. Além disso, os resultados mostraram que aumentar o fluxo de gás de entrada diminuiria a temperatura de entrada. O *XGBoost* estimou com precisão a temperatura de saída do moinho vertical e a potência do motor com base nas variáveis de monitoramento da planta, o que ao controlar tais variáveis tem-se que a vibração do corpo do moinho tende a estabilizar-se, reduzindo o consumo de energia e aumentando a produtividade da planta.

4.3 *Review on vertical roller mill in cement industry and its performance parameters (PAREEK, 2021)*

O artigo mostra uma revisão dos parâmetros de controle de um moinho vertical. Também traz o fato de que há uma ameaça se aproximando da indústria de cimento em que seu

custo de insumos está aumentando. O custo da energia, o custo do combustível e o custo da matéria-prima dobraram nos últimos anos, enquanto o preço do cimento não aumentou dessa maneira. Também 40% dos custos de produção de cimento são custos de energia, dos quais mais de 60% da eletricidade total é utilizada em circuitos de moagem. O objetivo do estudo é chamar a atenção para a necessidade de otimização do processo de moagem de cimento para minimizar o consumo de energia e alcançar maior produtividade. No estudo, são discutidos as vantagens do moinho de rolos verticais em relação aos moinhos de bolas, a construção do VRM (*Vertical Rall Mill*), seu processo e os parâmetros que afetam o desempenho e a produtividade do moinho vertical.

Com isso, é realizado um estudo teórico descrevendo as principais variáveis que afetam na produtividade do VRM, sendo elas o tamanho da granulometria dos materiais, variação na taxa de alimentação, pressão de moagem, *dam ring* (anel de contenção na borda da mesa que mantém um leito estável de material), condições de desgaste das capas dos rolos e da mesa, injeção de água, fluxo de gás na entrada do moinho, velocidade do classificador e espessura do leito de moagem. Com a otimização adequada desses parâmetros, a produtividade pode ser melhorada e a estabilidade do moinho pode ser alcançada beneficiando assim as organizações que usam VRM e não são capazes de utilizar sua produtividade total devido aos altos índices de vibração do moinho. Portanto, para utilizar sua capacidade total, alcançar alta produtividade e estabilidade, seus parâmetros de operação devem ser otimizados e mantidos sob controle.

Logo, comparando-se os trabalhos supracitados neste capítulo com o trabalho realizado nesta pesquisa percebe-se que em todos eles não é utilizado o *Lag*, ou seja, o atraso na influência das variáveis preditivas na resposta, o que afeta diretamente no controle preditivo e nas tomadas de decisões, pois diversas variáveis demandam de um intervalo de tempo para que a mudança/ação no processo tenha efeito na estabilidade do moinho vertical.

5 METODOLOGIA

Primeiramente, em busca de verificar as principais variáveis que impactam na vibração do corpo de um moinho de cimento, foi realizado a coleta de dados referente à 10 meses de operação de um moinho vertical, com intervalo de 30 segundos, armazenados diretamente pelo *Software PI System*. Os dados salvos em arquivos do tipo planilha foram selecionados de acordo com as variáveis apresentadas nos trabalhos relacionados e a experiência de operadores da planta que forneceram os dados.

Para a realização de uma análise como a apresentada neste trabalho, deve-se realizar, inicialmente, uma exploração dos dados, a fim de realizar uma preparação da base de dados, já que existem os momentos de parada do equipamento devido uma atividade corretiva ou preventiva. Logo, se faz necessário integrar os dados dispersos, excluir os *outliers*, valores vazios e variáveis que não estão relacionadas ao alvo. Após isso, métodos estatísticos podem ser utilizados para obtenção de conclusões sobre o processo produtivo. Aqui são utilizados os métodos listados a seguir.

- A regressão linear múltipla, visando estimar os parâmetros do modelo linear que melhor descreve as relações entre as variáveis.
- A média móvel, para obter uma suavização dos dados, mitigando efeitos de ruídos que podem estar presentes nos dados.
- *Lag* ou *delay*, que irá ajustar o banco de dados de acordo com o tempo que pode levar para uma dada variável de entrada impactar na variável de saída, ou resposta do modelo.

O modelo de regressão linear é apresentado brevemente neste trabalho, a fim de esclarecer o papel de cada variável utilizada neste estudo.

5.1 Regressão linear múltipla

Para análise dos dados utilizamos a regressão linear múltipla. Diferentemente da regressão linear simples, ela traz uma proposta de que há um conjunto de k variáveis ditas explicativas, ou de entrada, denotadas aqui por X_1, \dots, X_k ($k > 1$), que podem estar afetando a variável resposta, ou variável de saída (aqui a vibração do moinho, denotada por Y). Ou seja, tem-se uma função linear múltipla quando assumimos que o valor da variável explicada é função linear de duas ou mais variáveis explicativas. Segundo (HOFFMANN, 2006), uma regressão linear múltipla para k variáveis explanatórias é descrita da seguinte maneira:

$$Y_j = \beta_0 + \beta_1 X_{1j} + \beta_2 X_{2j} + \dots + \beta_k X_{kj} + u_j, \quad j = 1, \dots, n. \quad (5.1)$$

Ou de forma resumida:

$$Y_j = \beta_0 + \sum_{i=1}^j \beta_i X_{ij} + u_j. \quad (5.2)$$

Nestas equações (5.1 e 5.2), $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)$ são os coeficientes do modelo, os quais são parâmetros desconhecidos e devem ser estimados, X é a variável independente e Y é a variável dependente. Os coeficientes angulares do modelo (β) são também denominados coeficientes da regressão e o coeficiente linear do modelo (β_0) é também conhecido como termo constante da equação de regressão. O termo u_j representa o erro cometido ao escrever cada valor da variável resposta (Y_j), $j = 1, \dots, n$, em termos dos valores das variáveis explicativas contidas em uma matriz X . O termo de erro é uma variável aleatória, para a qual é assumida as seguintes suposições.

- A esperança dos erros é zero: $E[u_j] = 0$;
- A variância dos erros é constante: $Var(u_j) = \sigma^2$;
- Existe independência entre as observações, resultando na covariância dos erros igual a zero: $Cov(u_j, u_i) = 0, \forall i \neq j, j = 1, \dots, n$.

Na prática estas suposições podem não ser verdadeiras, levando a um modelo que não descreve de forma realística a relação existente entre a variável de entrada e a variável resposta. Assim, antes do modelo ser utilizado para fins de inferência, este deve ser validado por meio de análise de valores obtidos para os erros (conhecidos na literatura como resíduos) ou por outro método que seja mais conveniente, como uma validação cruzada, por exemplo. Na validação cruzada, os dados são divididos em amostras de treino, testes e validação do modelo adotado. Aqui são usadas apenas amostras de treino e teste, tendo em vista que não serão considerados parâmetros de complexidade do modelo. Mais detalhes sobre validação de um modelo de regressão pode ser visto em trabalhos como o de Snee (1977).

A variância dos erros σ^2 também é um parâmetro do modelo, ou seja, o seu valor deve ser estimado. Em geral, o método utilizado para estimar todos os parâmetros do modelo de regressão linear é o método dos mínimos quadrados, o qual não exigem pressuposto de distribuição para os erros. Este método procura minimizar a soma de quadrado dos erros, utilizando para isto os resíduos. Para maiores detalhes sobre o modelo, veja, por exemplo, Roberts e Roberts (2020).

Utilizando notação matricial o modelo fica

$$Y = X\beta + u \quad (5.3)$$

onde

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \dots & X_{k1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \dots & X_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{kn} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}$$

Neste caso, as suposições sobre o modelo ficam como segue.

- I) A variável dependente (Y_j) é função linear das variáveis explanatórias (X_{ij} , $i = 1, \dots, k$).
- II) Os valores das variáveis explanatórias são fixos.
- III) $E(u_j) = 0$, ou seja, $E(\mathbf{u}) = \mathbf{0}$, onde $\mathbf{0}$ representa um vetor de zeros.
- IV) Os erros são homocedásticos, isto é, $E(u_j^2) = \sigma^2$.
- V) Os erros são não-correlacionados entre si, isto é, $E(u_j u_h) = 0$ para $j \neq h$.
- VI) Os erros têm distribuição normal.

5.2 Média móvel

Neste trabalho, a média móvel utilizada é a aritmética simples, ela é responsável pela suavização dos dados formando um gráfico com tendência mais perceptível. Além disso, a média móvel é encarregada de amenizar os ruídos, que são mostrados nas variações mais amplas. Para calcular a média móvel, os períodos contínuos (sem todos os dados excluídos na etapa de pré-processamento) são processados separadamente. Depois disso, as partes dos dados são mescladas considerando os registros de data/hora, em que a notação "NA" é utilizada para os dados excluídos no pré-processamento.

Em seguida, para cada conjunto $x^c = \{x_{1j}^c, x_{2j}^c, \dots, x_{kj}^c\}$ das observações de cada período contínuo c (denotado por X_j^c) de uma variável explicativa X_j , a média móvel a esquerda (RMA) de ordem m , $s_m(\cdot)$, é aplicada de forma que cada valor da variável é substituído pela média entre ele e os $(m-1)$ anteriores a ele.

Este procedimento pode ser aplicado para todas as observações de cada variável, formando um novo conjunto de variáveis para cada ordem m que se deseja considerar. Ou seja, podemos obter $X_j^m = s_m(X_j)$, para $m = 1, 2, \dots, M$, em que a ordem $m = 1$ são os dados originais sem média móvel.

5.3 Lag

Algumas variáveis demandam de um certo tempo para que tenham efeito na variável resposta, com isso, inclui-se na análise o *Lag* (defasagem). O *Lag* é o número de períodos de tempo que separa duas séries temporais. Neste banco de dados, um *Lag* corresponde a 30 segundos. Assim, é considerada uma série de deslocamentos para mapear o *Lag* das variáveis, em que um conjunto de variáveis pode ser obtido a partir da combinação de L deslocamentos (ou defasamentos) para uma média móvel de ordem específica para cada variável de entrada. Denota-se $Lag_l(\cdot)$ uma função que aplica um deslocamento de comprimento l , então, dado um vetor $x_1 = (x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16})$,

$$Lag_2(x_1) = (NA, NA, x_{12}, x_{13}, x_{14}) \quad (5.4)$$

Observe que, o novo vetor tem um atraso de duas amostras em relação ao valor atual da resposta enquanto as duas últimas são descartadas por serem preditoras para os valores futuros da resposta.

Neste trabalho, a variável resposta (Y) refere-se a vibração do corpo de um moinho vertical, e esta terá como variáveis de entrada as seguintes variáveis.

- X_1 : Dosagem de clínquer na receita do cimento.
- X_2 : Dosagem de calcário na receita do cimento.
- X_3 : Dosagem de gesso na receita do cimento.
- X_4 : Dosagem de escória ou clínquer B na receita do cimento.
- X_5 : Pressão de moagem.
- X_6 : Injeção de água.
- X_7 : Rotação do separador.
- X_8 : Temperatura de entrada do moinho.
- X_9 : Temperatura de saída do moinho.
- X_{10} : Arraste (%DA01).
- X_{11} : Recirculação (%DA02).
- X_{12} : Diferencial de pressão do moinho.
- X_{13} : Diferencial de pressão do filtro.
- X_{14} : Potência da mesa.

Outrossim, duas variáveis não são consideradas acima, sendo mostradas a seguir.

- X_{15} : Alimentação total. Retirada devido redundância com as variáveis de dosagem de material na receita, pois a alimentação total é a soma das matérias primas utilizadas de acordo com o tipo de cimento produzido.
- X_{16} : Espessura da camada de material na mesa. Removida devido problemas físicos no atuador do sensor, marcando assim valores divergentes dos reais.

Esses métodos juntos aplicados ao banco de dados deverá trazer um modelo melhor ajustado aos dados, já que nos trabalhos relacionados citados, os dados não são ajustados completamente, faltando assim a aplicação do *Lag*.

5.4 Tipos de cimento produzidos na planta considerada para coleta de dados

Explicando brevemente sobre os cimentos produzidos na planta cimenteira em estudo, temos os seguintes tipos.

- CP II F - 32: com adição de material carbonático e faixa de classe de resistência mínima aos 28 dias de $32MPa$, é um cimento considerado de classe simples composto por Clínquer + Sulfatos de cálcio entre 75% e 79% e Material carbonático entre 11% e 25%. Assim, por ser considerado um cimento de classe simples, ele pode ser produzido com adição de clínquer B.

- CP III - 40 RS: cimento Portland de alto-forno e faixa de classe de resistência mínima aos 28 dias de 40 MPa, tem esse acrônimo RS que significa resistência a sulfatos. É considerado um cimento especial, sendo composto por Clínquer + Sulfatos de cálcio entre 25% e 65%, Escória granulada de alto-forno entre 35% e 75% e Material carbonático entre 11% e 25%.
- CP V ARI: sendo um cimento especial de alta resistência inicial, em um dia de idade deve apresentar resistência igual ou maior que 14 MPa e a 7 dias uma resistência a compressão igual ou maior que 34 MPa. Ele é composto por Clínquer + Sulfatos de cálcio entre 90% e 100% e Material carbonático entre 0% e 10%. Por ser um cimento especial, não deve-se utilizar clínquer B, ou seja, um clínquer de má qualidade.

Aqui foram considerados dados de produção do cimento "CP II F - 32". No entanto, outras análises devem ser realizadas para os demais tipos produzidos. Estas análises são deixadas aqui como trabalhos futuros.

6 RESULTADOS

Este capítulo mostra resultados das análises realizadas através da coleta de dados referente ao processo produtivo de um moinho vertical em uma planta cimenteira. Aqui, percebe-se a influência das variáveis de operação com a vibração do corpo do moinho, como também a interferência das ações de um operador do painel no controle da análise dos dados.

6.1 Séries de tempo para todas as variáveis sem aplicação de filtro

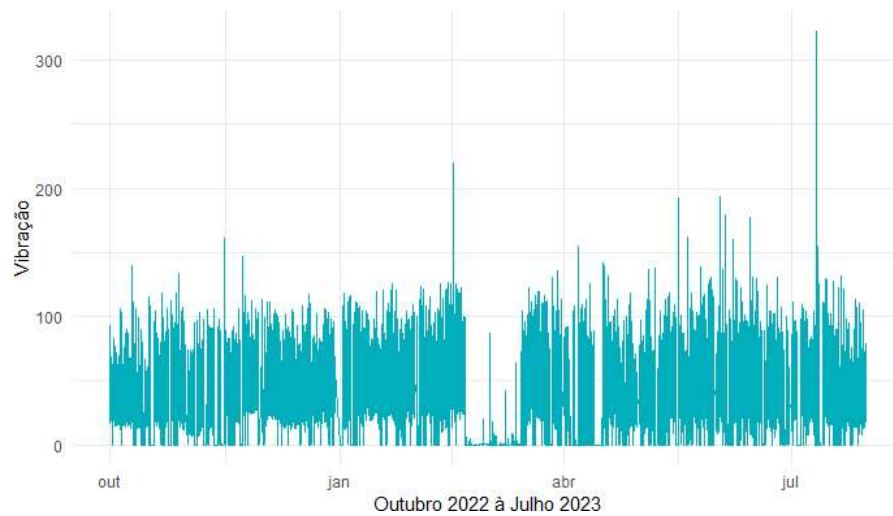
Esta seção mostra os gráficos de série de tempo de todas as variáveis abordadas no trabalho sem aplicação de filtros para remoção de ruídos. O período de tempo utilizado para estes gráficos são de outubro de 2022 à julho de 2023.

6.1.1 *Vibração do corpo do moinho*

Normalmente, a carcaça de moinhos verticais de rolos possui em sua parte inferior uma estrutura que executa várias funções principais incluindo o suporte para os outros componentes do moinho, abrigo ao redutor e mesa de moagem, e conexão ao sistema de dutos de gases quentes. O corpo principal do moinho é uma carcaça cilíndrica montada sobre a parte inferior que abriga o sistema de moagem. Ele também é a seção através da qual o conjunto de rolos é acionado pelo sistema hidráulico contra a mesa de moagem. Ademais, a casca do moinho é protegida por placas substituíveis de desgaste. Além disso, várias pequenas aberturas no corpo do moinho servem para permitir o ingresso de conjuntos tais como a injeção de água, ar de selagem, lubrificação aos rolos de moagem, etc.

A Figura 7 mostra os dados de vibração para o período supracitado, em que tem-se valores referentes a vibração do corpo do moinho, que é o principal parâmetro de controle operacional de um moinho vertical para manter a integridade dos demais equipamentos.

Figura 7 – Vibração do corpo do moinho vertical (μm).



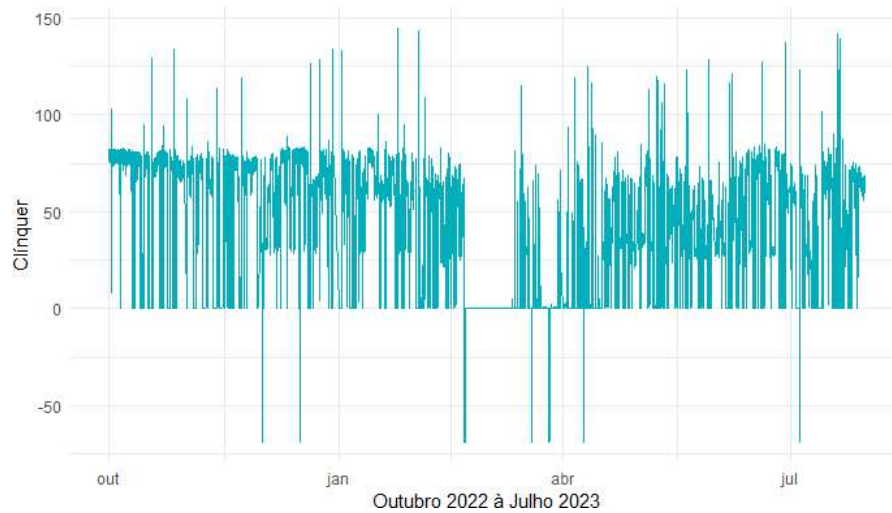
Fonte: AUTORA (2023).

A vibração do moinho quando apresenta valores iguais a 0 não contribuirá para a análise das variáveis que afetam na vibração do corpo do moinho, pois representam momentos em que o moinho esteve parado ou com rolos suspensos. Ou seja, não estava realizando o processo de cominuição dos materiais. Por outro lado, os valores de vibração acima de $200 \mu m$ também não devem ser considerados, pois segundo o manual dos moinhos verticais marca UBE e o PLC (*Programmable Logic Controller* - Controlador Lógico Programável), o moinho deve parar ao atingir esse valor por 2 segundos. Assim, tais valores não deverão contribuir para o mapeamento das variáveis que contribuem para o aumento da vibração do moinho.

6.1.2 *Dosagem de clínquer na receita do cimento*

O clínquer é o principal componente da composição dos tipos de cimento.

Figura 8 – Dosagem de clínquer na receita (t/h).



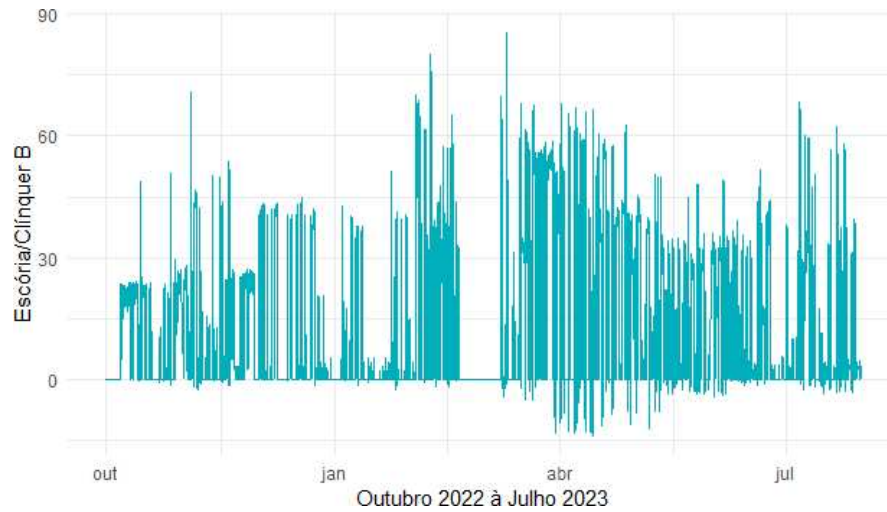
Fonte: AUTORA (2023).

Neste gráfico observa-se valores negativos de alimentação de clínquer no moinho e valores iguais a zero. Deste modo, tais valores devem ser removidos do banco de dados, pois também representam momentos em que não houve dosagem de clínquer para alimentação do moinho. Adicionalmente, valores acima de 100 t/h também são considerados ruídos, pois este é o valor que representa o máximo de clínquer dosado na receita considerando a produção máxima do moinho vertical estudado no trabalho.

6.1.3 Dosagem de escória/clínquer B na receita do cimento

A escória de alto forno é bastante utilizada na fabricação dos cimentos compostos, em que neste trabalho é utilizado na produção do cimento CP III - 40 RS. Porém, para a mesma balança dosadora de escória, a planta cimenteira em estudo esvazia o silo de escória sempre que necessário e abastece clínquer B para a produção de CP II - F 32. O clínquer B é um clínquer que foi produzido fora das especificações de qualidade devido variações no processo, assim ele só deve ser utilizado na produção do cimento mais simples como forma de reaproveitamento.

Figura 9 – Dosagem de escória na receita (t/h).



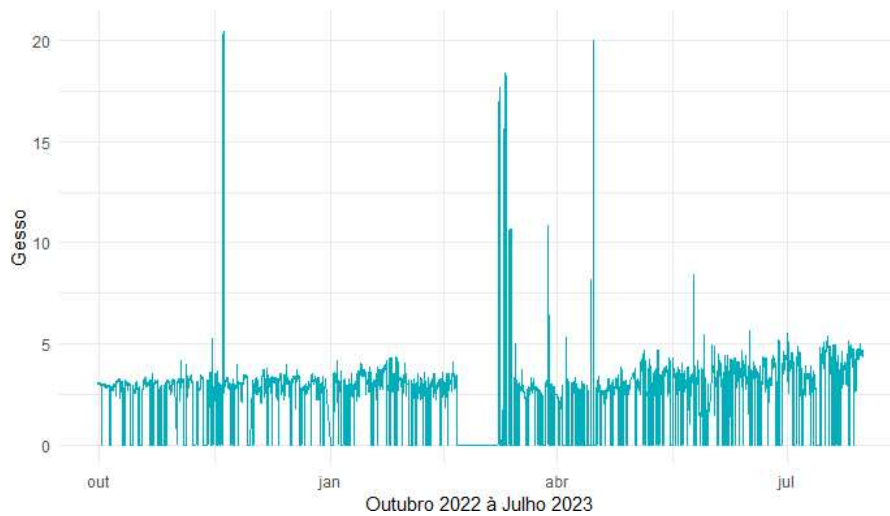
Fonte: AUTORA (2023).

Aqui, pode ser observado no gráfico valores negativos de alimentação de escória/clínquer B no moinho, os quais não pode existir dosagem de material negativa, devendo assim serem removidos. Além disso, valores acima de 60 t/h também são considerados ruídos, por este ser o valor que representa o máximo de material dosado de acordo com o tipo de cimento que será analisado e com a produção máxima que este modelo de moinho vertical na planta cimenteira estudada suporta.

6.1.4 Dosagem de gesso na receita do cimento

O gesso, fonte de SO_3 , é o material responsável pelo controle do tempo de pega do cimento, retardando o endurecimento que acontece quando o clínquer moído entra em contato com a água. Logo, é de suma importância ter uma dosagem controlada do gesso pois o tempo de enrijecimento do cimento muda de acordo com os tipos de cimento.

Figura 10 – Dosagem de gesso na receita (t/h).



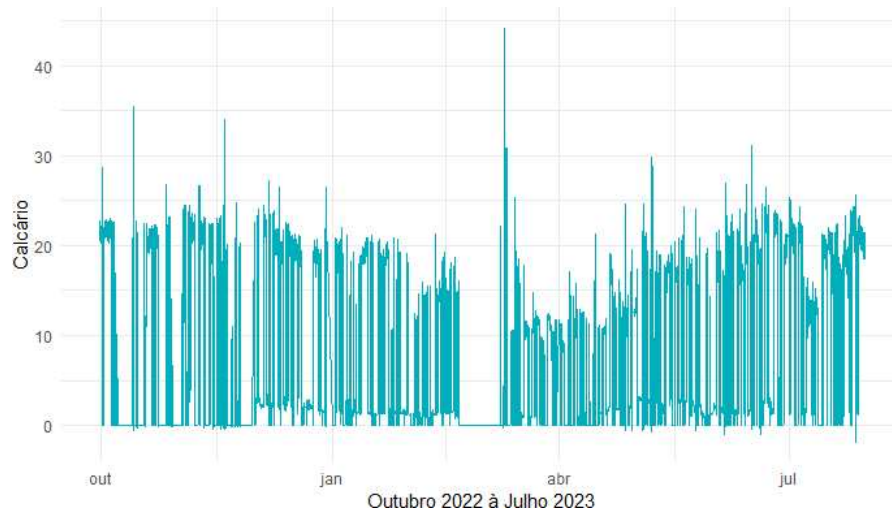
Fonte: AUTORA (2023).

Neste gráfico observa-se valores iguais a zero, os quais devem ser removidos, pois indicam valores em que o moinho não esteve em operação. Assim, valores acima de 5 t/h também são considerados ruídos, pois este é o valor que representa o máximo de gesso possível dosado na receita de acordo com o tipo de cimento estudado considerando a máxima produção do moinho vertical analisado neste trabalho.

6.1.5 Dosagem de calcário na receita do cimento

O calcário tem uma importância significativa na moagem de cimento. Ele influencia na aglomeração dos materiais, eficiência de moagem, umidade, *blaine*, entre outros aspectos. Entretanto, uma dosagem incorreta de calcário pode influenciar negativamente no cimento, causando uma perda de resistência e durabilidade, geralmente devido ao aumento do tamanho das partículas, acarretando em um *blaine* alto e uma maior quantidade de resíduos.

Figura 11 – Dosagem de calcário na receita (t/h).



Fonte: AUTORA (2023).

Neste gráfico observa-se valores negativos de alimentação de calcário no moinho, os quais não pode existir dosagem de material negativa, bem como valores iguais a zero. Assim, esses valores devem ser removidos, pois representam momentos em que não houve dosagem de calcário na alimentação do moinho. Ademais, valores acima de 30 t/h também são considerados ruídos, pois este valor representa o máximo de calcário admissível referente a máxima produção que o moinho vertical analisado suporta.

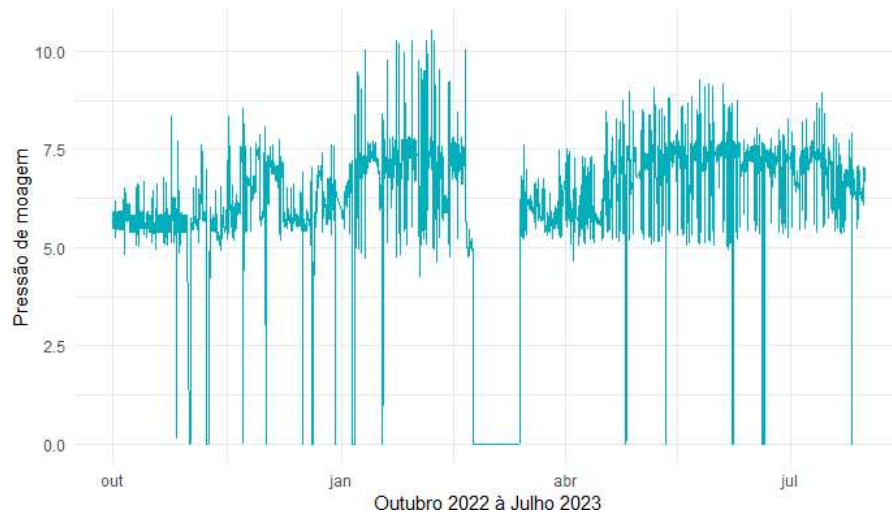
6.1.6 Pressão de moagem

A principal função do sistema hidráulico consiste em aplicar uma pressão de moagem contra o leito de material na mesa de moagem durante a operação. A função secundária é atuar como um sistema amortecedor para movimentar os rolos para acompanhar as variações na mesa de moagem. Finalmente, o sistema alivia a carga sobre o motor durante a partida, erguendo os rolos sobre o leito de moagem. Os quatro rolos do moinho são conectados separadamente a um cilindro hidráulico através de um braço de alavanca e uma haste de tensão. Cada cilindro é equipado com acumuladores hidráulicos, cujo óleo fica em conexão direta com a extremidade do pistão do cilindro. Os acumuladores absorvem o impacto e funcionam como molas pneumáticas permitindo que os rolos se movam em etapas devido às variações na espessura do leito de material. Assim, a pressão de moagem, isto é, a pressão do óleo na parte superior do pistão pode ser regulada para os quatro cilindros.

A pressão de moagem, bem como a produção do moinho, pode ser aumentada ou

diminuída através de um aumento ou diminuição da pressão hidráulica dos cilindros, dentro é claro, de determinados limites de projeto. Deste modo, a capacidade de produção de um moinho vertical de rolos depende diretamente da pressão exercida pelos rolos de moagem sobre o leito na mesa de moagem.

Figura 12 – Pressão de moagem (*MPa*).



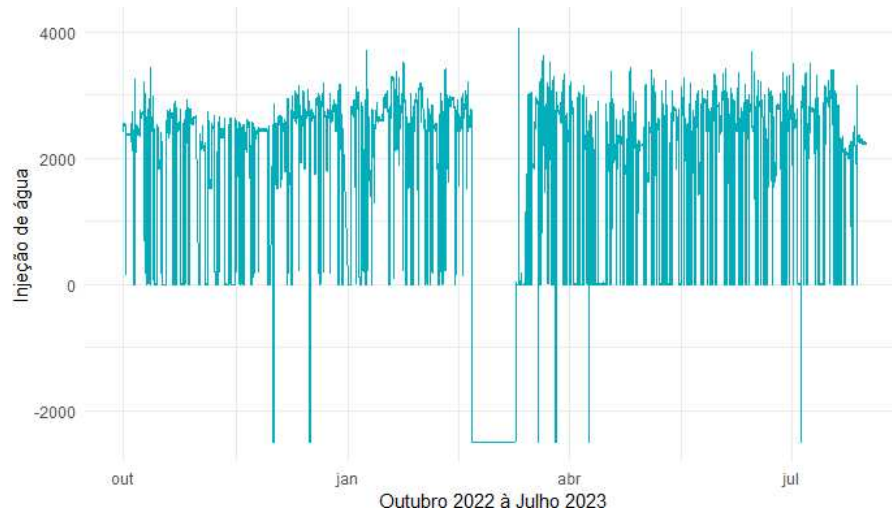
Fonte: AUTORA (2023).

A pressão de moagem para este modelo de moinho vertical é de no mínimo 5 *MPa* e no máximo 8 *MPa*. Com isso, valores que não estejam nesse *range* podem ser considerados momentos em que o moinho não esteve em operação, devendo assim serem removidos do banco de dados.

6.1.7 Injeção de água

A injeção de água é importante pois ela proporciona uma maior acomodação de material na mesa, estabilizando de forma mais uniforme o leito de moagem. Se o tamanho das partículas alimentadas não se mantém constante, como quando se tornam muito finas, tenderão a ser “expulsas” da pista de moagem pela pressão hidráulica exercida pelos rolos. Neste caso, o leito de moagem irá diminuir, o moinho ficará instável e começará a vibrar, assim, a adição de água irá “reter” o material sobre a pista, estabilizando o processo e virtualmente reduzindo as vibrações.

Figura 13 – Injeção de água (L/h).



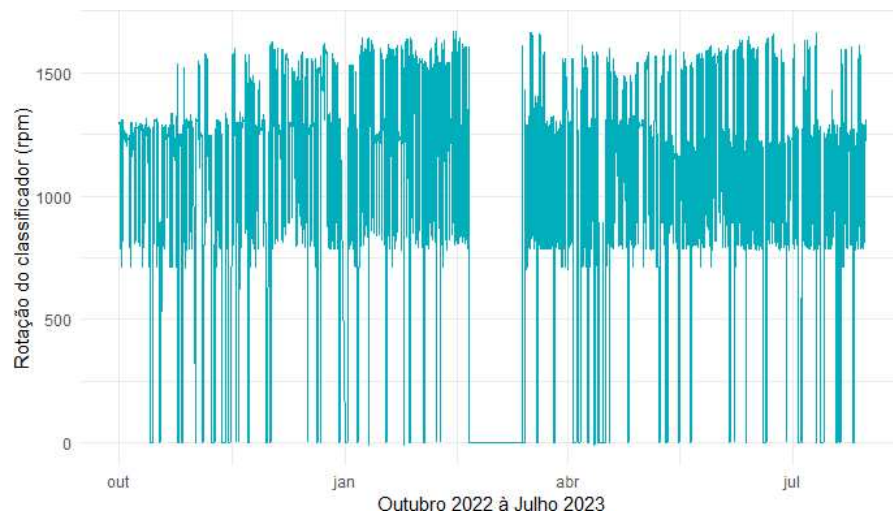
Fonte: AUTORA (2023).

Neste gráfico observa-se valores negativos de injeção de água no moinho, que claramente não podem existir. Além disso, valores iguais a zero também devem ser removidos, pois indicam que o moinho não esteve em operação. O valor máximo de injeção de água não deve exceder em 3000 L/h, pois representa o máximo de água admissível com relação ao máximo de produção que este moinho vertical suporta de acordo com a porcentagem de umidade do cimento. Portanto, os valores a serem considerados no banco de dados são aqueles maiores que zero e menores que 3000 L/h.

6.1.8 Rotação do classificador (rpm)

A rotação do classificador ou separador é um parâmetro de extrema relevância na classificação do material obtendo-se assim a finura adequada para cada tipo de cimento. Ela tem influência direta na vibração do moinho pois com o aumento da sua rotação, ela selecionará com maior afinco a granulometria do material, fazendo com que esse material passe mais tempo dentro do moinho, aumentando assim o diferencial de pressão do moinho.

Figura 14 – Rotação do classificador (*rpm*).



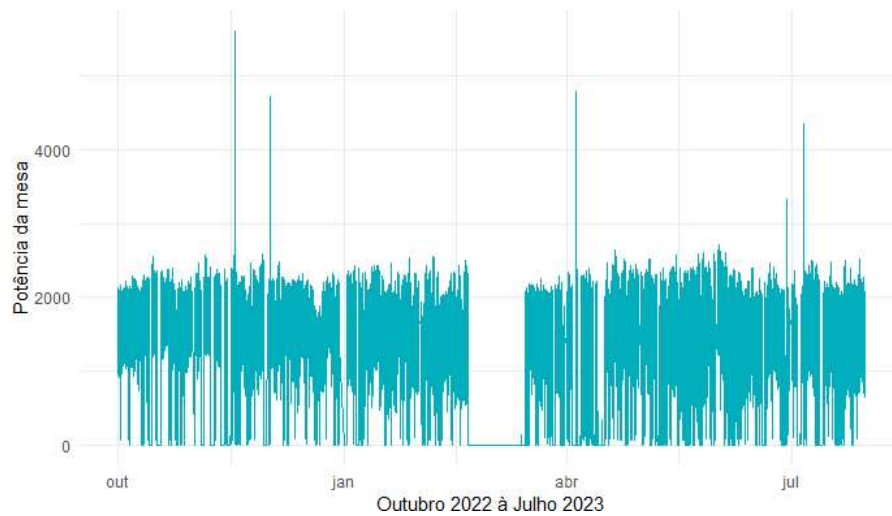
Fonte: AUTORA (2023).

O separador quando apresenta um valor zero de rotação, significa que o sistema que permite uma operação do moinho vertical está totalmente parado. Deste modo, valores iguais a zero devem ser removidos do banco de dados. Além disso, os valores a serem considerados para análise não podem exceder a 1750 rpm, pois é o valor de rotação nominal do equipamento. Portanto, apenas valores maiores que zero e inferiores a 1750 rpm devem ser considerados para análise.

6.1.9 Potência do acionamento da mesa

A potência de motor do acionamento da mesa é um dos parâmetros monitorados pela operação pois é um indicativo de que a mesa está mais cheia, necessitando assim de um maior consumo de energia elétrica para acionamento da mesa e energia térmica para secagem dos materiais. Ademais, uma mesa com potência de acionamento alta, pode indicar maiores valores de produtividade ou até mesmo problemas relacionados a travamentos da mesa de moagem ou do redutor.

Figura 15 – Potência do acionamento da mesa (kW).



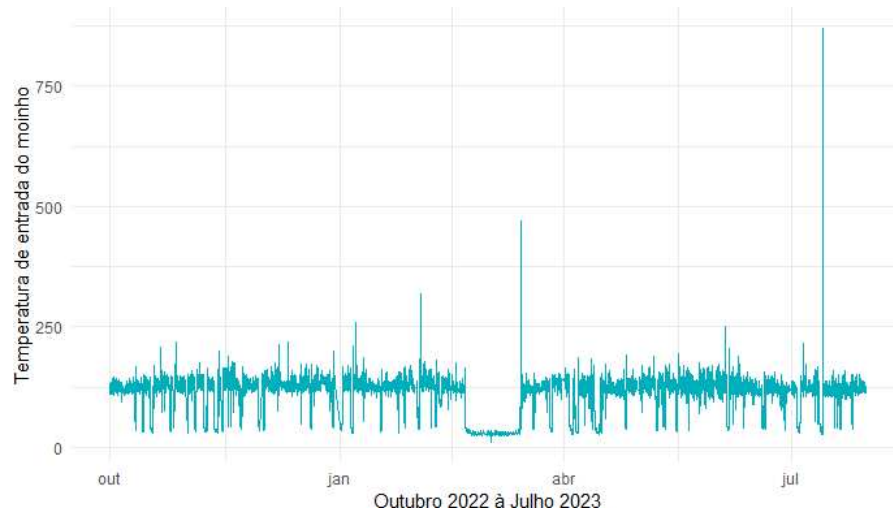
Fonte: AUTORA (2023).

Neste gráfico, observa-se que valores iguais a zero, no entanto esses valores representam momentos em que o moinho esteve com o motor parado. Ou seja, não estava realizando o processo de cominuição dos materiais. Outro ponto, são os valores acima de 2600 kW , pois segundo o manual dos moinhos verticais marca UBE e o PLC (*Programmable Logic Controller* - Controlador Lógico Programável), o moinho deve parar ao atingir esse valor por 5 segundos. Portanto, valores de potência que estejam fora dos limites que vai de 0 até 2600 kW devem ser removidos do banco de dados.

6.1.10 Temperatura de entrada do moinho

O controle da temperatura de entrada do moinho é de suma importância para garantir a estabilidade, pois qualquer alteração repentina na temperatura acarretará em uma variação no fluxo de gases e na capacidade de exaustão do material moído, elevando ou reduzindo o diferencial de pressão do moinho.

Figura 16 – Temperatura de entrada do moinho (°C).



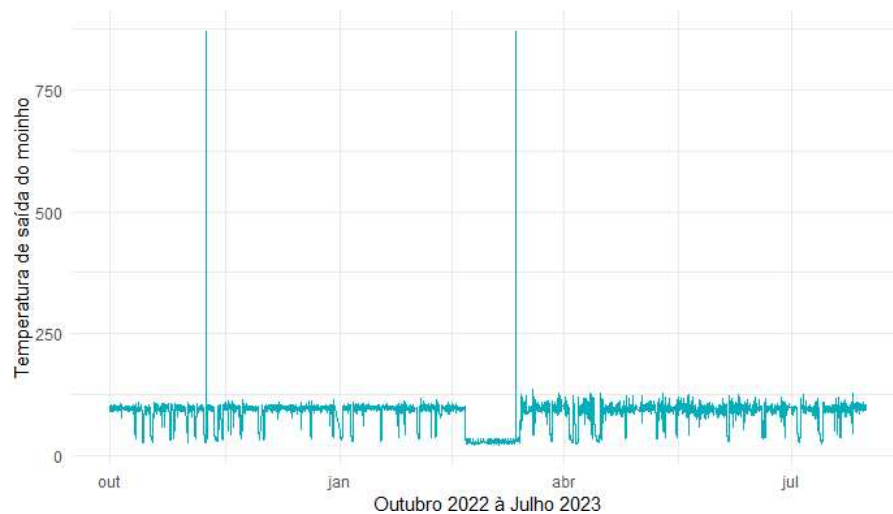
Fonte: AUTORA (2023).

A temperatura de entrada do moinho inferior a 50 °C significa que o equipamento estava parado em processo de manutenção. E superior a 200 °C seria um valor irreal quando se trata da operação deste modelo de moinho vertical, logo devem ser removidos.

6.1.11 Temperatura de saída do moinho

A temperatura de saída do moinho deve-se manter estável assim como a temperatura de entrada, por motivos equivalentes.

Figura 17 – Temperatura de saída do moinho (°C).



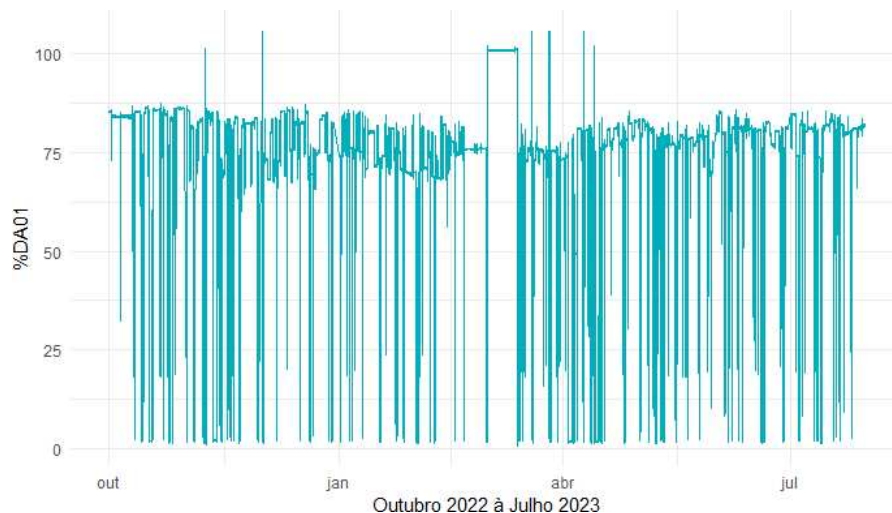
Fonte: AUTORA (2023).

Temperatura de saída do moinho inferior a 50 °C significa que o equipamento esteve parado em manutenção. E superior a 150 °C seria um valor irreal quando se trata da operação deste modelo de moinho vertical, logo devem ser removidos.

6.1.12 Arraste/Exaustão dos gases

O arraste do material moído se dá devido a exaustão dos gases quentes provindos de um gerador de calor através da alta rotação de um ventilador de média. Ademais, o ventilador sempre opera com 100% da sua capacidade, sendo que o controle do fluxo de gases necessário é controlado através da abertura ou fechamento de um *damper*.

Figura 18 – Arraste/Exaustão dos gases (%DA01).



Fonte: AUTORA (2023).

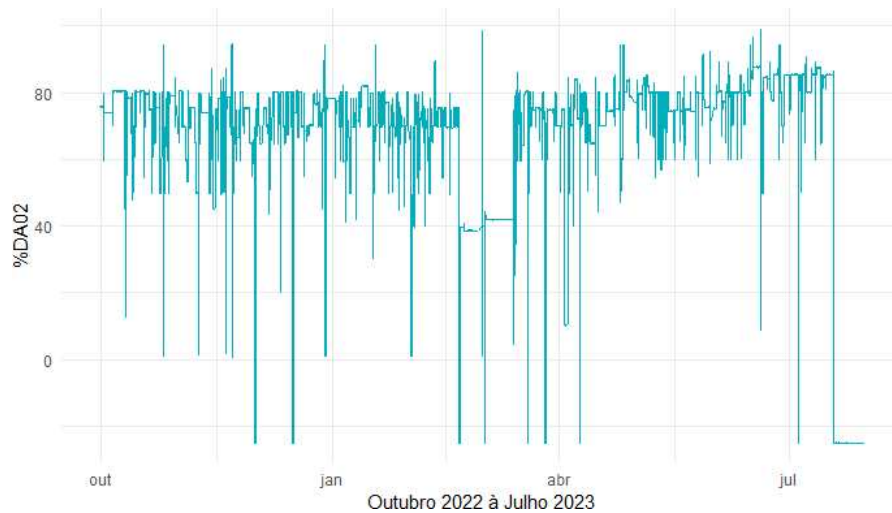
Quando a porcentagem do *damper* está zerada, significa que o moinho está parado, pois não há como operar um moinho vertical de rolos com a gelosia fechada. Logo, esses valores devem ser removidos. Além disso, valores acima de 86% com o moinho em operação causariam uma sobrecarga no exaustor principal devido a elevação da potência por excesso de vazão de gases, assim, estes valores também devem ser removidos do banco de dados.

6.1.13 Recirculação dos gases

A recirculação dos gases é controlada por um *damper*. Localizado após o filtro principal, ele é responsável por reaproveitar uma parte dos gases que ainda estão aquecidos retornando e misturando-se com os gases de entrada do moinho novamente. Assim, uma parcela

do volume do gás é reaproveitado diminuindo o consumo térmico, e a outra fração remanescente dos gases é expelida na chaminé.

Figura 19 – Recirculação dos gases (%DA02).



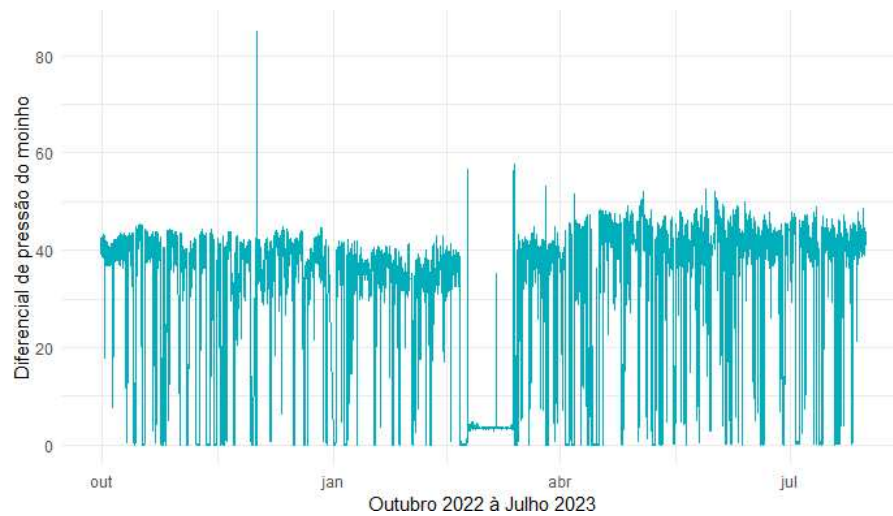
Fonte: AUTORA (2023).

A porcentagem desse *damper* não pode ser negativa e nem superior a 100%, pois são valores que fisicamente não podem ser alcançados pelo *damper*. Portanto, apenas devem ser considerados para análise os valores observados que estejam no intervalo [0, 100].

6.1.14 Diferencial de pressão do moinho

Alimentar excessivamente o moinho na tentativa de aumentar sua produtividade pode levar o ventilador de exaustão a exceder sua capacidade limite de projeto, ultrapassando a pressão operacional máxima. Desta forma, teremos uma diminuição no fluxo de transporte bem como no consumo de energia do ventilador. Assim, parte do material já moído irá “cair”, recirculando de volta à mesa de moagem ao invés de ser arrastado ao separador, aumentando assim o seu diferencial de pressão devido a pressão de saída ficar cada mais negativa em razão de uma maior restrição no duto de saída do moinho pelo material moído (cimento), e assim o moinho irá começar a vibrar devido ao excesso de material sobre a mesa de moagem. Mas também, o moinho pode vibrar por um baixo diferencial de pressão, indicando que o moinho está com baixa alimentação, ou seja, uma baixa camada de material na mesa.

Figura 20 – Diferencial de pressão do moinho (*mbar*).



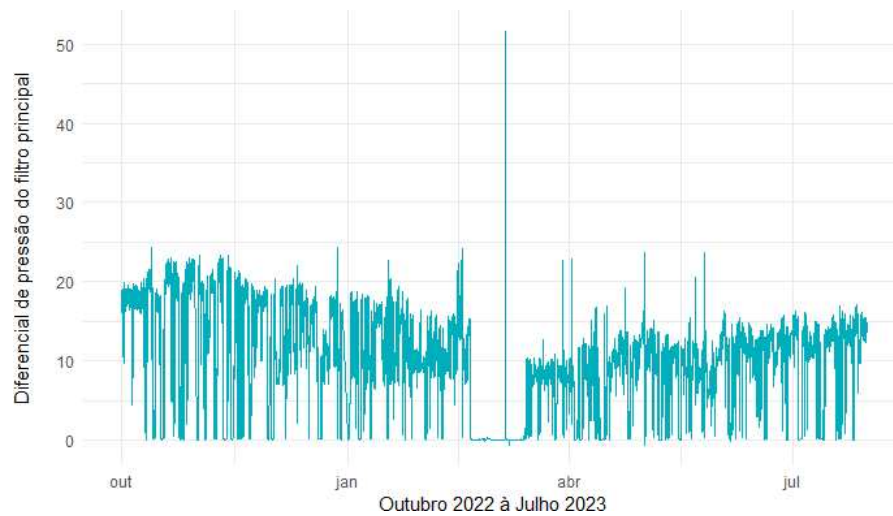
Fonte: AUTORA (2023).

Sendo a diferença entre os pontos de pressão de entrada e saída do moinho, esta variável não deve assumir o valor zero, pois significa que o moinho está parado. Valores maiores que 50 *mbar* também não são realísticos, pois representa um grau de enchimento elevado para este modelo de moinho vertical de cimento, causando altos índices de vibração, chegando até a parar a operação deste equipamento. Portanto, os valores a serem considerados na análise são aqueles que são maiores que zero e menores que 50 *mbar*.

6.1.15 Diferencial de pressão do filtro

Esta variável é importante para a operação de um moinho vertical, pois o filtro de mangas é responsável pela separação do cimento produzido dos gases, em que o material finalizado é transportado por regueiras fluidizadas e armazenados em silos, e os gases são liberados pela chaminé.

Figura 21 – Diferencial de pressão do filtro (*mbar*).



Fonte: AUTORA (2023).

O diferencial de pressão dos filtro principal caso apresente valores nulos, significa que o moinho está parado. Valores maiores que 24 *mbar* representam um grau de saturação elevado nas mangas do filtro ou uma deficiência de limpeza no filtro, o que também caracterizam momentos de operação fora das condições consideradas normais. Portanto, apenas são considerados para análise, valores que sejam maiores que zero e menores que 24 *mbar*.

A Tabela 1 fornece, de forma resumida, os limites considerados como possíveis momentos em que o moinho opera em condições normais. Assim, nesse primeiro filtro, todos os valores que estejam fora desses limites são removidos do banco de dados, para que seja dada continuidade ao processo de análise dos dados advindo da operação deste moinho.

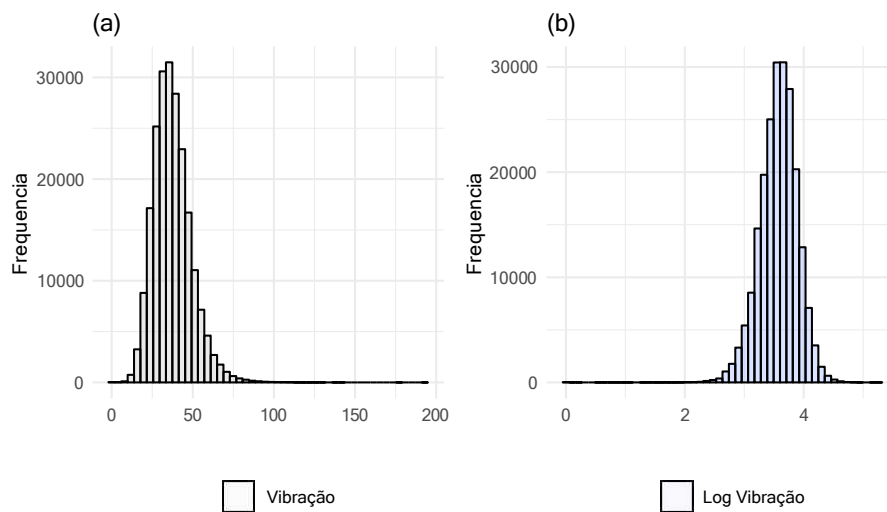
Variáveis	Limites
Vibração do corpo do moinho (m)	1 à 200
Dosagem de clínquer (t/h)	1 à 100
Dosagem de escória/clínquer B (t/h)	1 à 60
Dosagem de gesso (t/h)	1 à 5
Dosagem de calcário (t/h)	1 à 30
Pressão de moagem (MPa)	5 à 8
Injeção de água (L/h)	1 à 3000
Rotação do classificador (rpm)	1 à 1750
Potência da mesa (kW)	1 à 2600
Temperatura de entrada do moinho (°C)	50 à 200
Temperatura de saída do moinho (°C)	50 à 150
Arraste/Exaustão dos gases (%)	1 à 86
Recirculação dos gases (%)	1 à 100
Diferencial de pressão do moinho (mbar)	1 à 50
Diferencial de pressão do filtro principal (mbar)	1 à 24

Tabela 1 – Limites utilizados para primeira filtragem dos dados considerados para análise.

6.2 Variável Resposta

A variável de saída a ser investigada aqui é a vibração do moinho. Assim, uma preocupação é quanto a forma da distribuição desta variável. A Figura 22 (a) mostra o histograma dos dados de vibração sem transformação. Esse histograma apresenta leve assimetria a direita, o que levou a consideração em realizar a transformações de Box-cox (SAKIA, 1992).

Figura 22 – Histograma da variável resposta com e sem a aplicação do logaritmo.



Fonte: AUTORA (2023).

6.3 Análise de defasagem de tempo

As variáveis explicativas consideradas neste estudo são aquelas que podem estar correlacionadas com a vibração do moinho. Deste modo, são verificadas as correlações entre cada variável de entrada e a vibração para diferentes defasagens de tempo impostas na variável de entrada. Cada defasagem corresponde a uma demora de 30 segundos para que uma determinada variável de entrada afete o comportamento da vibração. Essa defasagem é denominada aqui simplesmente como "*Lag*". Deste modo, para cada variável explicativa considerada para o processo de modelagem foram considerados de zero até 500 *Lags*. Em que zero corresponde a um impacto imediato da explicativa na resposta e 500 corresponde a uma demora de 500×30 segundos (ou 250 minutos \approx 4 horas) para que uma mudança na variável explicativa provoque uma mudança na variável resposta.

Para este estudo, foram considerados dois tipos de correlações. A correlação de Pearson (PEARSON, 1920), que supõem uma correlação linear entre as variáveis e a correlação

mutua clássica (TISOC; BELTRÁN, 2022), que leva em consideração a entropia dos dados. Esta última não faz suposição sobre o tipo de relacionamento entre as variáveis estudadas. A correlação de Pearson é um valor entre -1 e 1. Quando o valor está próximo de 1 indica correlação forte e direta, enquanto valores próximos de -1 indicam correlação forte e inversa. Adicionalmente, valores de correlação próximos de zero indicam baixa correlação.

Diferentemente da correlação de Pearson, a correlação mutua assume valores entre 0 e 1. Valores próximos de 1 indicam correlação forte, enquanto valores próximos de 0 indicam correlação fraca. Esse tipo de correlação não indica a direção da correlação, apenas a sua intensidade. Valor zero para esta correlação indica ausência total de correlação, enquanto o valor 1 indica correlação perfeita.

Aqui é apresentada uma análise de correlação entre variáveis que podem afetar a vibração do moinho, considerando a produção de um tipo de cimento.

6.4 Resultados apenas para o cimento CP II F - 32

A Figura 23 mostra os gráficos contendo os valores das correlações estudadas para cada variável de entrada versus a variável resposta (vibração do moinho), considerando dados obtidos da produção do cimento CP II F - 32. Em cada gráfico mostrado, pode ser percebida a curva da correlação ao longo dos valores de *Lag* aplicado na variável explicativa. De um modo geral, pode ser visto que somente algumas variáveis apresentam evidências para a existência de defasagem no tempo, no que diz respeito ao impacto causado na resposta por uma mudança em seus valores. Nesta figura, os dois primeiros gráficos mostram as correlações obtidas da vibração versus ela mesma, assim o primeiro ponto de correlação tem o valor 1. Ou seja, neste caso a correlação perfeita só ocorre quando não se tem lag, como é de se esperar.

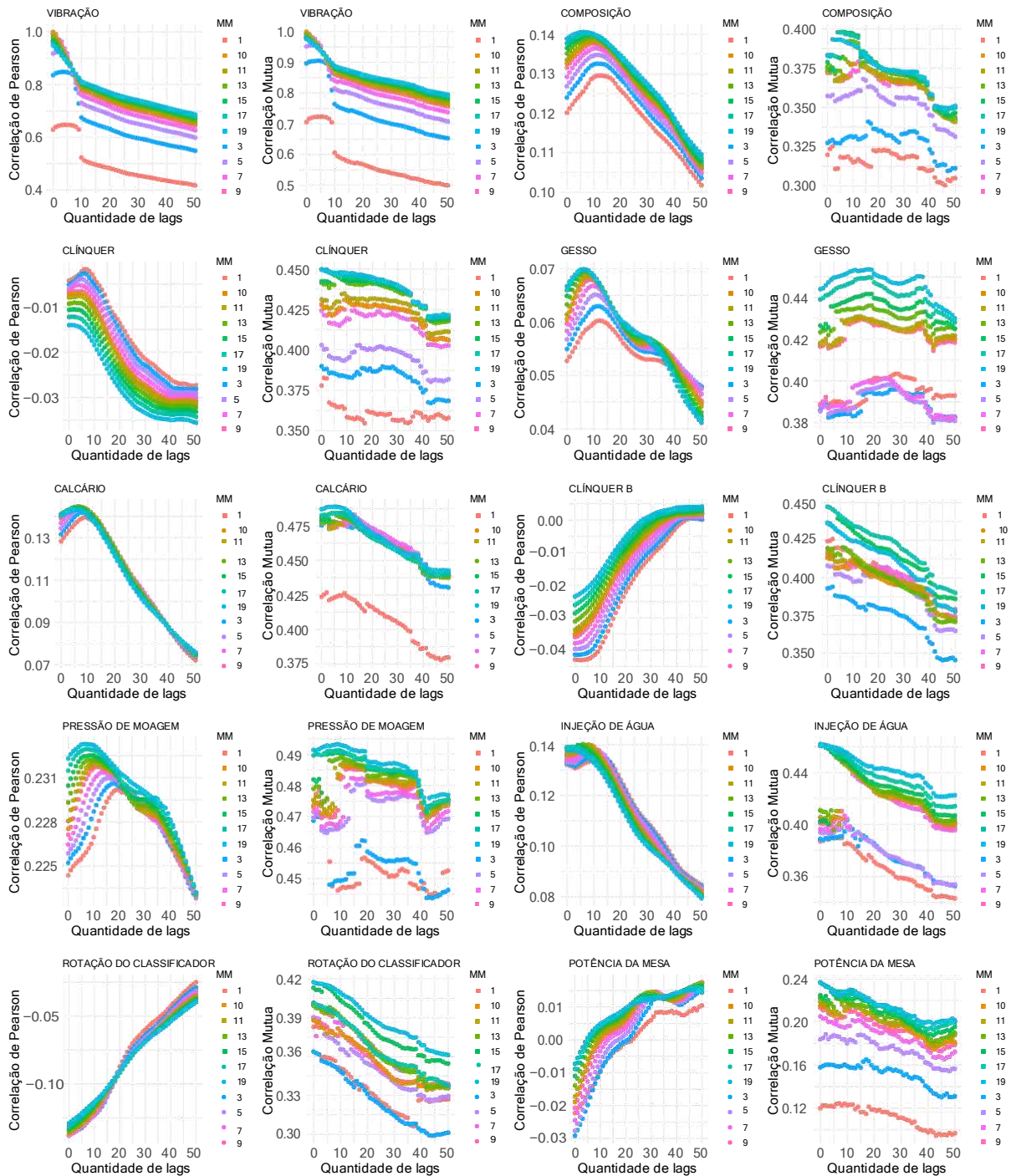
Na segunda linha de gráficos é possível observar os gráficos de correlações da variável clínquer, que no estudo com correlação mutua não é possível observar defasagem. No entanto, a correlação de Pearson mostra defasagem de até o valor máximo estudado de *Lag*, que é o valor 50, mas ocorreu uma queda até atingir o valor 10. Como a correlação apresentada é pequena, menor que 0,05, não é possível identificar se ocorre ou não defasagem no impacto desta variável. Devido a essa correlação muito pequena, é possível que a influência causada pela adição de clínquer na vibração ocorra por meio de uma relação não linear. Esse comportamento de correlação baixa no método de Pearson e alta quando se usa a correlação mutua, também ocorre para as seguintes variáveis: Gesso; Clínquer B; Potência da Mesa; %DA01; %DA02;

Diferencial de Pressão do Moinho e Diferencial de Pressão do Filtro Principal.

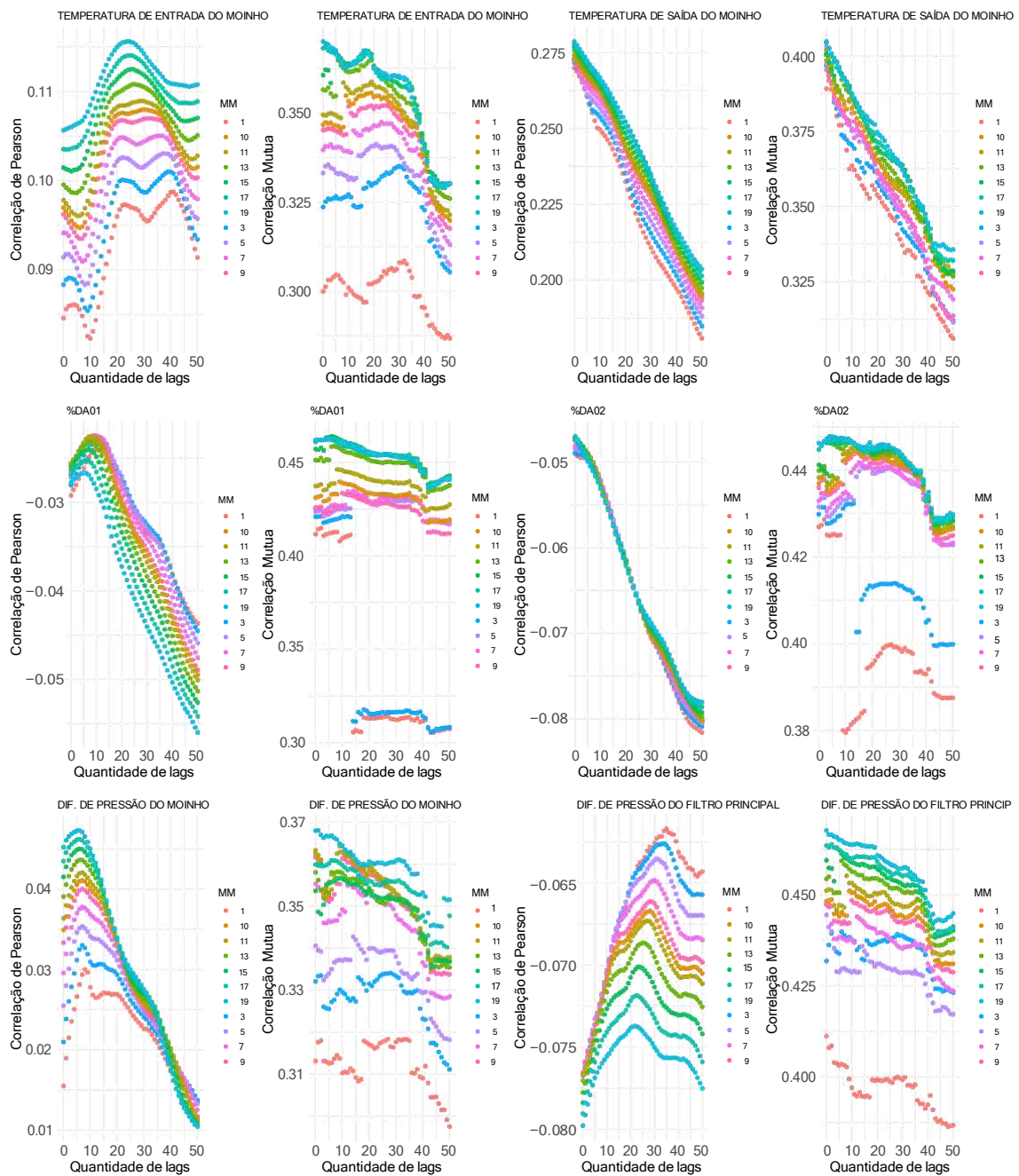
Algumas variáveis apresentam evidências para defasagem, tanto pela correlação de Pearson, como pela correlação mutua. São elas: Gesso; Calcário; Pressão de Moagem; %DA01; %DA02 e Diferencial de Pressão do Moinho. Essa informação pode ser confirmada nas Tabelas 2 e 3.

Como pode ser visto nas Tabelas 2 e 3, bem como nos gráficos mostrados na Figura 23, algumas variáveis apresentam defasagem apenas no estudo da correlação de Pearson, são elas: Clínquer; Clínquer B; Injeção de Água e Temperatura de Entrada. No entanto, não ocorreu de uma variável apresentar defasagem na correlação mutua e não apresentar defasagem no estudo com a correlação de Pearson. Isso pode ocorrer devido a relação entre as variáveis não ser linear.

Figura 23 – Correlação entre a Vibração e cada variável explicativa para diferentes valores de lag e média móvel.



Continua na próxima página.



Fonte: AUTORA (2023).

Como não se pode garantir a relação de linearidade, foram obtidas as correlações mutuas, que podem ser vistas na Tabela 3 e na segunda coluna de gráficos da Figura 23. Os valores para esse tipo de correlação são entre 0 e 1. Em que valores próximos de 0 indicam correlação fraca, enquanto valores próximos de 1 indicam correlação forte. Todas as variáveis de entrada mostraram correlações moderadas, com valores próximos de 0,5, exceto a Vibração que consigo mesma mostra correlação perfeita igual a 1. A combinação das proporções de componentes do cimento apresentaram defasagem de 6 *Lags*, tanto na correlação mutua, como

na correlação de Pearson. As demais defasagens exigem uma análise mais cuidadosa para sua definição.

6.4.1 Transformação para variáveis composicionais

As variáveis Gesso, Calcário, Clínquer e Clínquer B (quando este último está presente na receita de cimento) resultam na variável Alimentação Total do moinho. Assim, podemos considerar seus valores em percentuais. Nesta última configuração, tais variáveis são consideradas em Aitchison (1982) como sendo variáveis composicionais. Isso se deve ao fato de a soma de todos os valores resultarem sempre em uma mesma quantidade, no caso 100, se considerarmos porcentagens, ou 1 se considerarmos proporções. Assim, podemos utilizar uma transformação geométrica para todas essas variáveis para combinar as informações em uma única variável, denominada aqui de Composição.

Esse tipo de transformação é útil para evitar o uso de variáveis explicativas com correlação entre si, em modelos de aprendizado de máquinas. Pois é sabido que a existência de correlação entre as variáveis explicativas prejudicam o desempenho do modelo. Portanto, em vez de serem usados os valores das variáveis que compõem a alimentação total, é preferível o uso da variável Composição, obtida da seguinte forma:

$$\text{Composição} = (\text{Gesso} \times \text{Calcário} \times \text{Clínquer} \times \text{Clínquer B})^{(1/4)}, \quad (6.1)$$

Tabela 2 – Valores máximos de correlação de Pearson, juntamente com a quantidade de amostras para a média móvel e valor de defasagem em lags.

Variável	Média Móvel	Lag	Correlação de P.
VIBRAÇÃO	10	0	1
COMPOSIÇÃO	19	6	0,14
CLÍNQUER	19	50	-0,04
GESSO	17	6	0,07
CALCÁRIO	11	6	0,14
CLÍNQUER B	1	2	-0,04
PRESSÃO DE MOAGEM	19	7	0,23
INJEÇÃO DE ÁGUA	13	6	0,14
ROTAÇÃO DO CLASSIFICADOR	5	0	-0,14
POTÊNCIA DA MESA	3	0	-0,03
TEMPERATURA DE ENTRADA DO MOINHO	19	24	0,12
TEMPERATURA DE SAÍDA DO MOINHO	19	0	0,28
%DA01	19	50	-0,06
%DA02	1	50	-0,08
DIF. DE PRESSÃO DO MOINHO	19	6	0,05
DIF. DE PRESSÃO DO FILTRO PRINCIPAL	19	0	-0,08

6.4.2 *Análise das relações via correlação de Pearson*

As variáveis que apresentaram correlação de Pearson de modo significativo são: Composição, a qual foi definida na seção anterior; Calcário; Pressão de Moagem; Injeção de Água; Rotação do Classificador; Temperatura de Entrada e Temperatura de Saída. Sendo que, aparentemente, a adição de calcário parece afetar a vibração do moinho de modo direto. Ou seja, mais calcário representaria mais vibração. No entanto, na prática, é percebido que isso não ocorre. Pois, a adição de calcário implica na redução de adição de clínquer ou em aumento da produtividade total do moinho. Como o clínquer é um material de difícil moagem, ao adicionar calcário a tendência é que a vibração do moinho seja reduzida a medida que é reduzida a adição de clínquer. Sendo assim, em razão de uma melhor cominuição do material, o operador consegue aumentar a produtividade do moinho, aumentando seu grau de enchimento e, conseqüentemente, a vibração também é aumentada. Deste modo, a correlação percebida entre a variável Calcário e a Vibração pode ser considerada como uma correlação espúria. Ou seja, é um tipo de correlação que ocorre devido a fatores que não podem ser levados em consideração, de um ponto de vista da análise estatística.

O mesmo cenário pode ser percebido ao adicionar Clínquer. Conforme o estudo dos dados, a adição de Clínquer influencia para a redução da vibração, como sugere os dois últimos gráficos da terceira linha de gráficos da Figura 23. Entretanto, na realidade isso não acontece. O clínquer é o material de maior dureza, e ao se adicionar clínquer, significa que houve uma redução de calcário na receita. Isso causa instabilidade no moinho e aumentará o índice de vibração, fazendo com que o operador do painel de controle venha a reduzir a alimentação do moinho, reduzindo assim a vibração. Em relação a variável Composição, existem evidências de que esta contribua diretamente para a vibração do moinho.

Gesso, calcário e clínquer, caso apresentem defasagem, esta deve ser a mesma, pois estes elementos são incluídos na receita do cimento ao mesmo tempo. Assim, as variáveis Gesso e Calcário parecem obedecer a certo relacionamento linear com a vibração do moinho. Pois, como mostra a Tabela 2, a análise de correlação de Pearson mostrou evidências para a existência de uma defasagem de 30×6 segundos, ou seja, 6 lags. No entanto, Clínquer e Clínquer B não apresentaram resultados que parecem realísticos.

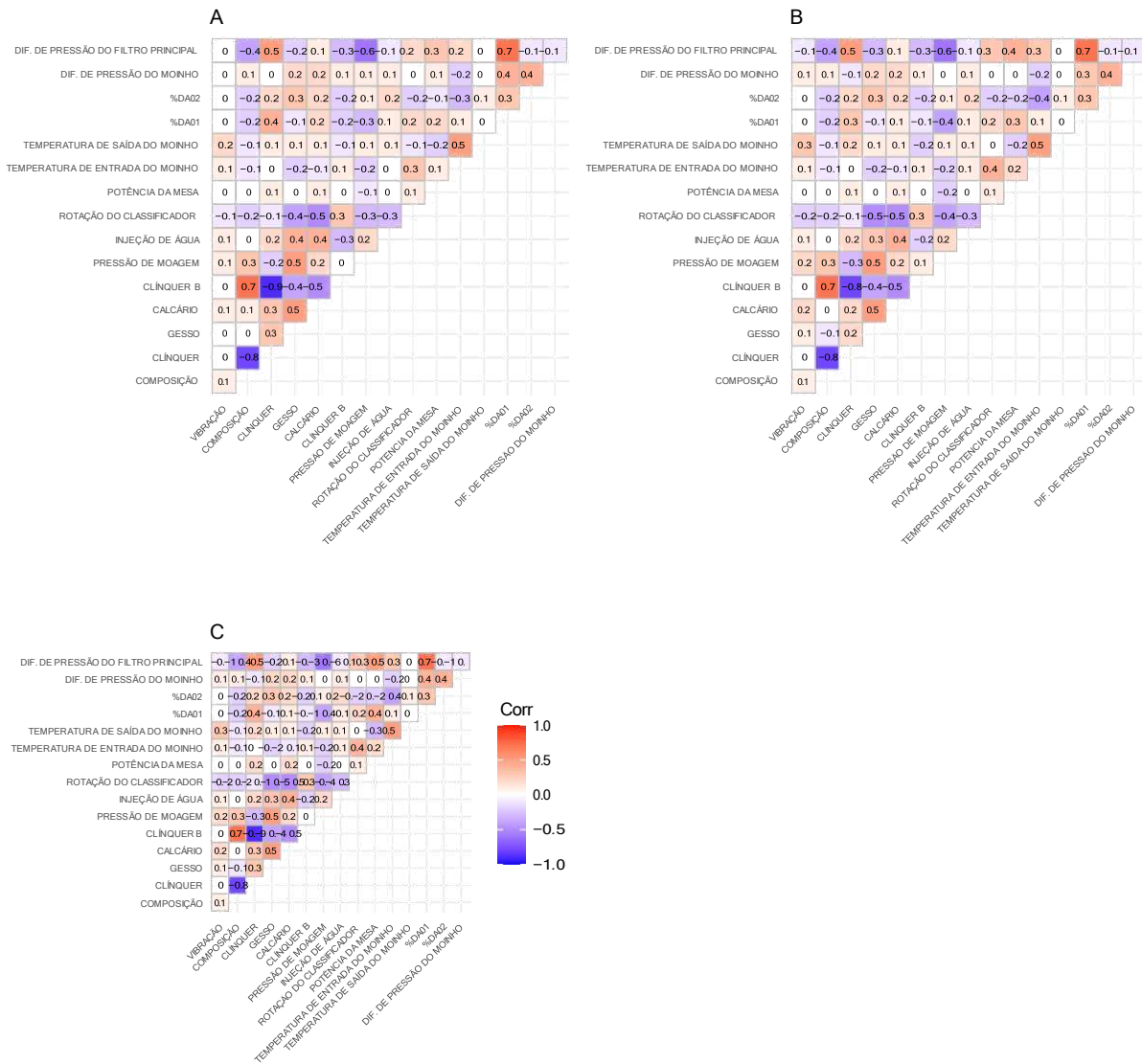
Devido a incerteza acerca da linearidade ou não da relação entre as variáveis de entrada e a vibração do moinho, é importante observar o gráfico de pontos de cada variável de entrada, versus a variável resposta (Vibração).

Tabela 3 – Valores máximos de correlação mutua, juntamente com a quantidade de amostras para a média móvel e valor de defasagem em lags.

Variável	Média Móvel	Lag	Correlação Mutua
VIBRAÇÃO	10	0	1
COMPOSIÇÃO	15	6	0,40
CLÍNQUER	17	0	0,45
GESSO	19	18	0,45
CALCÁRIO	19	5	0,49
CLÍNQUER B	17	0	0,45
PRESSÃO DE MOAGEM	19	9	0,49
INJEÇÃO DE ÁGUA	19	0	0,46
ROTAÇÃO DO CLASSIFICADOR	19	0	0,42
POTÊNCIA DA MESA	17	0	0,24
TEMPERATURA DE ENTRADA DO MOINHO	19	0	0,37
TEMPERATURA DE SAÍDA DO MOINHO	17	0	0,40
%DA01	15	6	0,46
%DA02	19	4	0,45
DIF. DE PRESSÃO DO MOINHO	19	1	0,37
DIF. DE PRESSÃO DO FILTRO PRINCIPAL	19	0	0,47

A Figura 24 mostra o gráfico das correlações entre todas as variáveis. O gráfico A mostra as correlações de Pearson antes de serem aplicados lags e média móvel. O gráfico B mostra o resultado das correlações após aplicados lags e médias móveis a partir da análise de correlação de Pearson. Finalmente, o gráfico C mostra as correlações após a aplicação de média móvel e lags a partir da análise de correlação mutua. Nesta figura, é possível perceber correlação forte entre algumas variáveis explicativas.

Figura 24 – Matriz de correlação para os dados antes e após o processamento com lags e média móvel.



Fonte: AUTORA (2023).

6.4.3 Análise das relações via gráficos de pontos

A Figura 25 mostra os gráficos de pontos para todas as variáveis de entrada versus a variável Vibração, considerando os dados sem aplicação de *Lag* e média móvel (MM), com aplicação da MM e *Lag* obtidos a partir da maior correlação de Pearson, em valor absoluto, e com aplicação da MM e *Lag* obtidos a partir da maior correlação mútua, respectivamente para cada linha de gráficos desta figura.

Aparentemente, a variável Composição sugere um comportamento mais linear que suas composições, mostrando ser uma boa opção quando se adota o pré-suposto de linearidade.

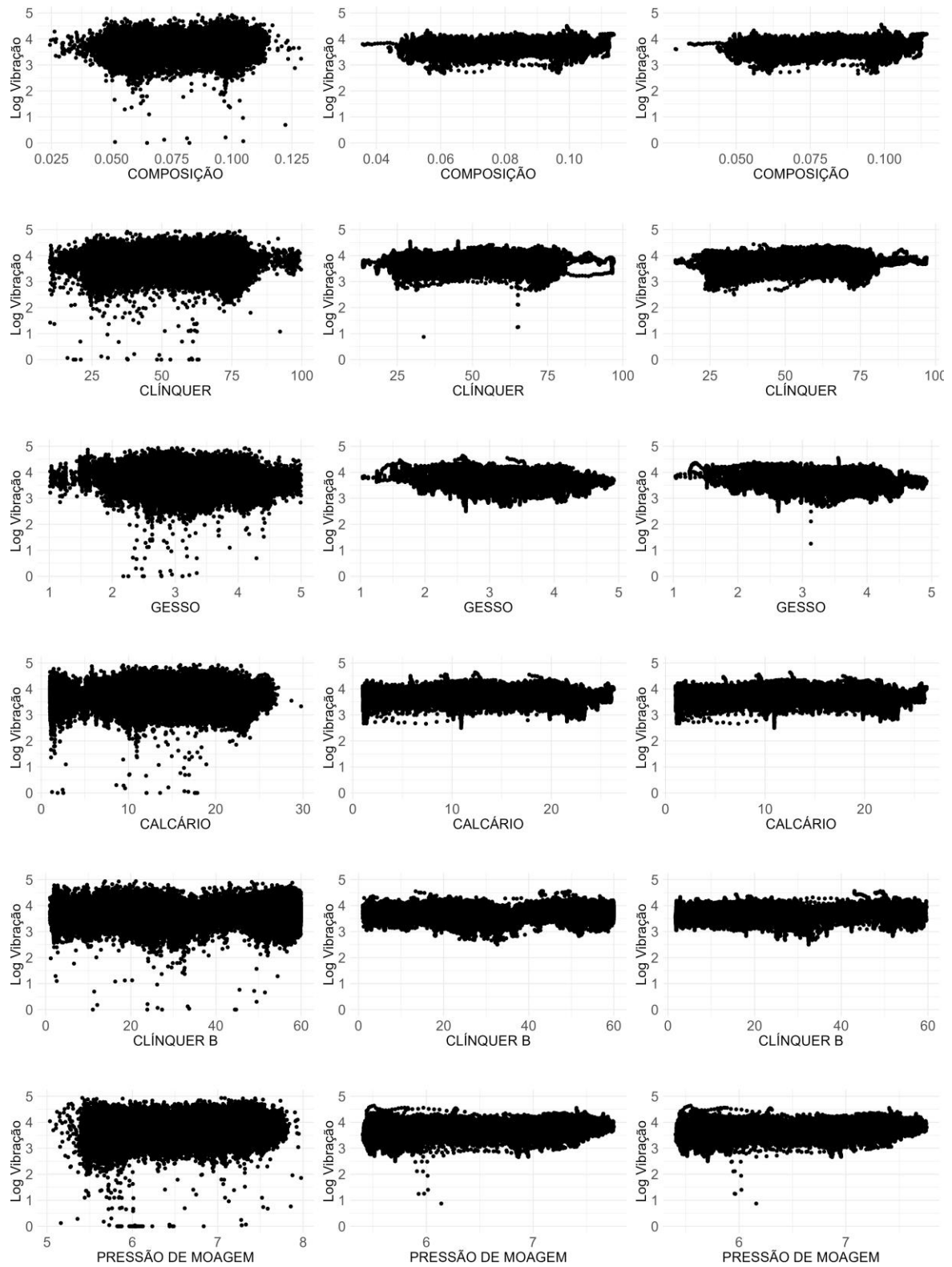
No entanto, variáveis com baixa correlação de Pearson, como o Diferencial de Pressão do moinho, por exemplo, exibem uma relação de não linearidade nos gráficos de pontos. Desta forma, tais variáveis, podem não ser úteis em modelos que assumem suposição de linearidade entre as variáveis explicativas e a resposta considerada.

Em relação ao estudo de *Lags* e médias móveis, para variáveis com baixa correlação de Pearson, são considerados na análise os valores de defasagem e média móvel apontados pela correlação mutua e gráfico de pontos, além das características do processo produtivo. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.

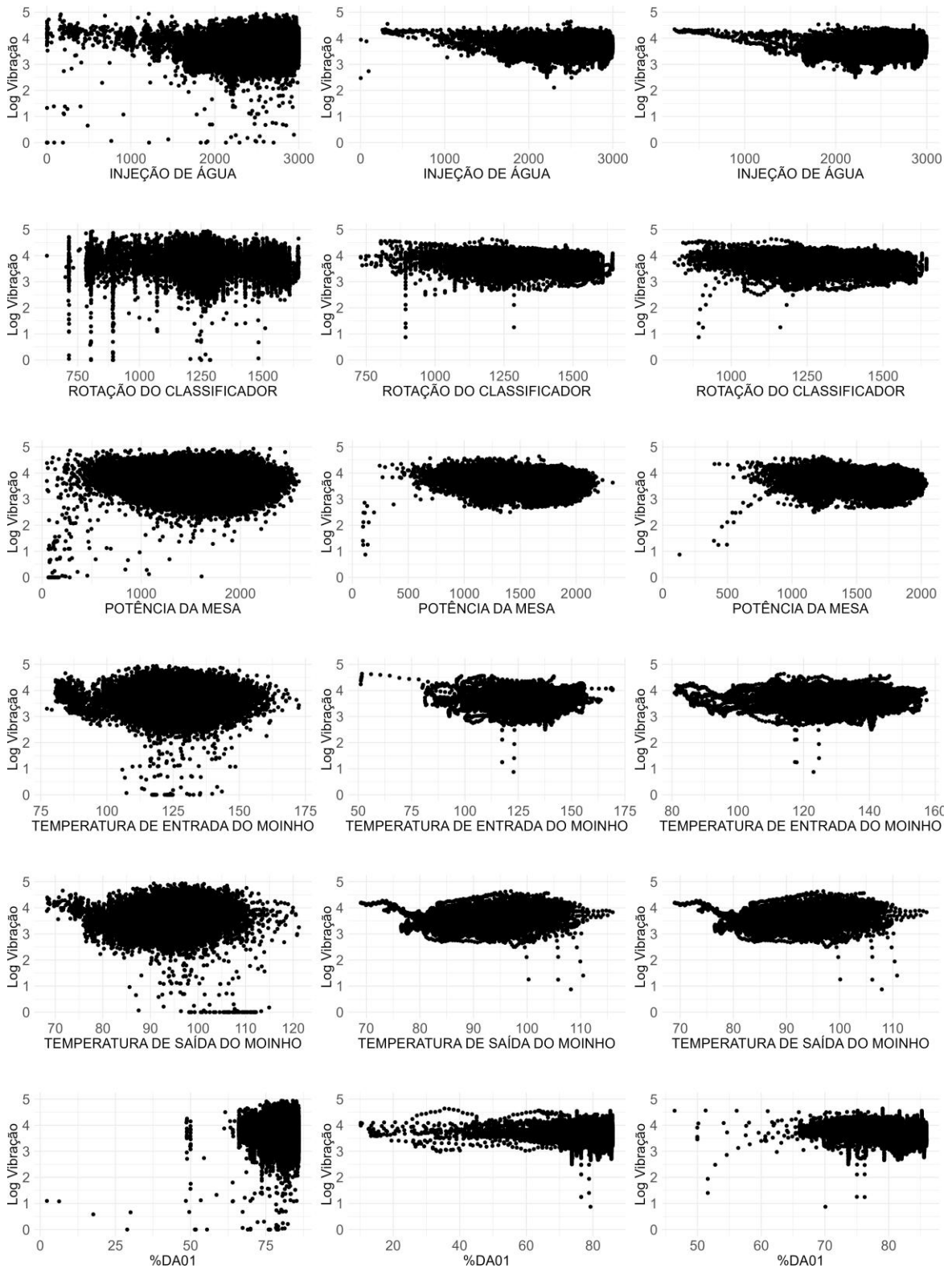
Tabela 4 – Valores estimados para quantidade de amostras para a média móvel e valor de defasagem em lags.

Variável	Média Móvel	Lag	Tipo Cor.	Valor Cor.
COMPOSIÇÃO	15	6	Mutua	0,40
PRESSÃO DE MOAGEM	19	7	Pearson	0,23
INJEÇÃO DE ÁGUA	13	6	Pearson	0,14
ROTAÇÃO DO CLASSIFICADOR	5	0	Pearson	-0,14
POTÊNCIA DA MESA	17	0	Mutua	0,24
TEMPERATURA DE ENTRADA DO MOINHO	19	24	Pearson	0,12
TEMPERATURA DE SAÍDA DO MOINHO	19	0	Pearson	0,28
%DA01	15	6	Mutua	0,46
%DA02	19	4	Mutua	0,45
DIF. DE PRESSÃO DO MOINHO	19	6	Pearson	0,05
DIF. DE PRESSÃO DO FILTRO PRINCIPAL	19	0	Pearson	-0,08

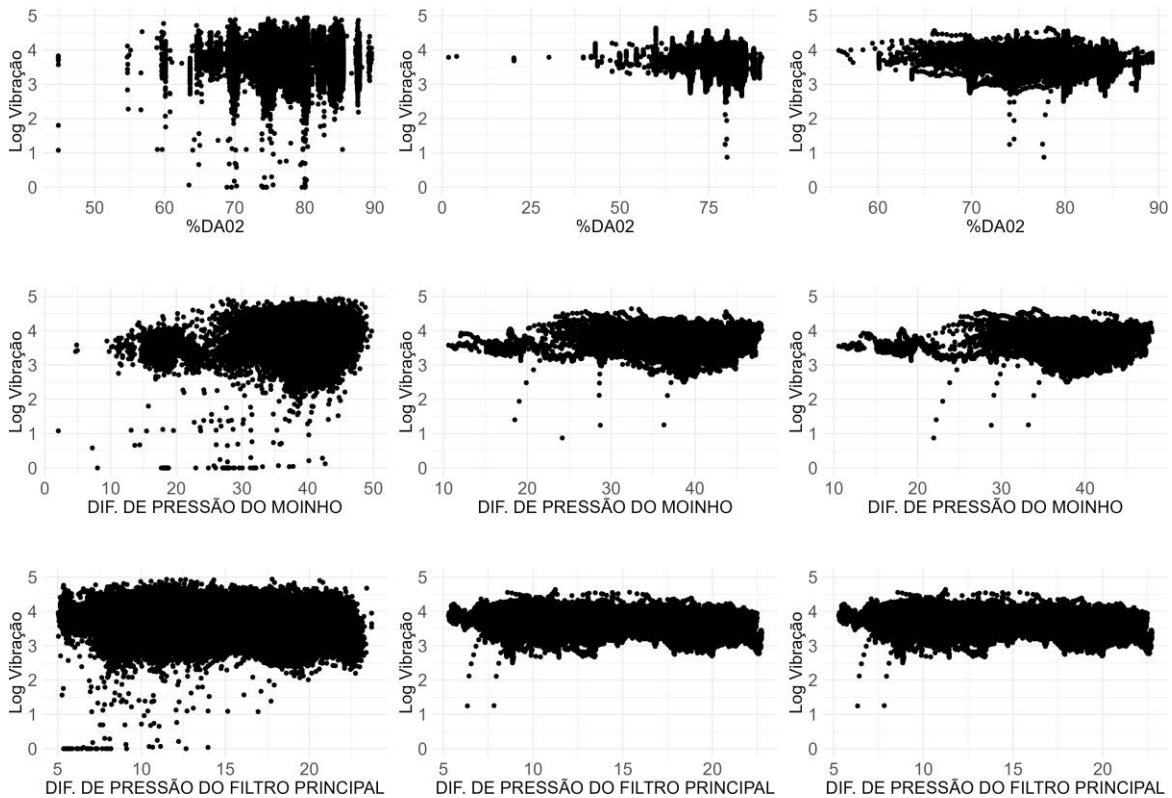
Figura 25 – Gráfico de pontos para todas as variáveis de entrada versus a variável Vibração



Continua na próxima página.



Continua na próxima página.



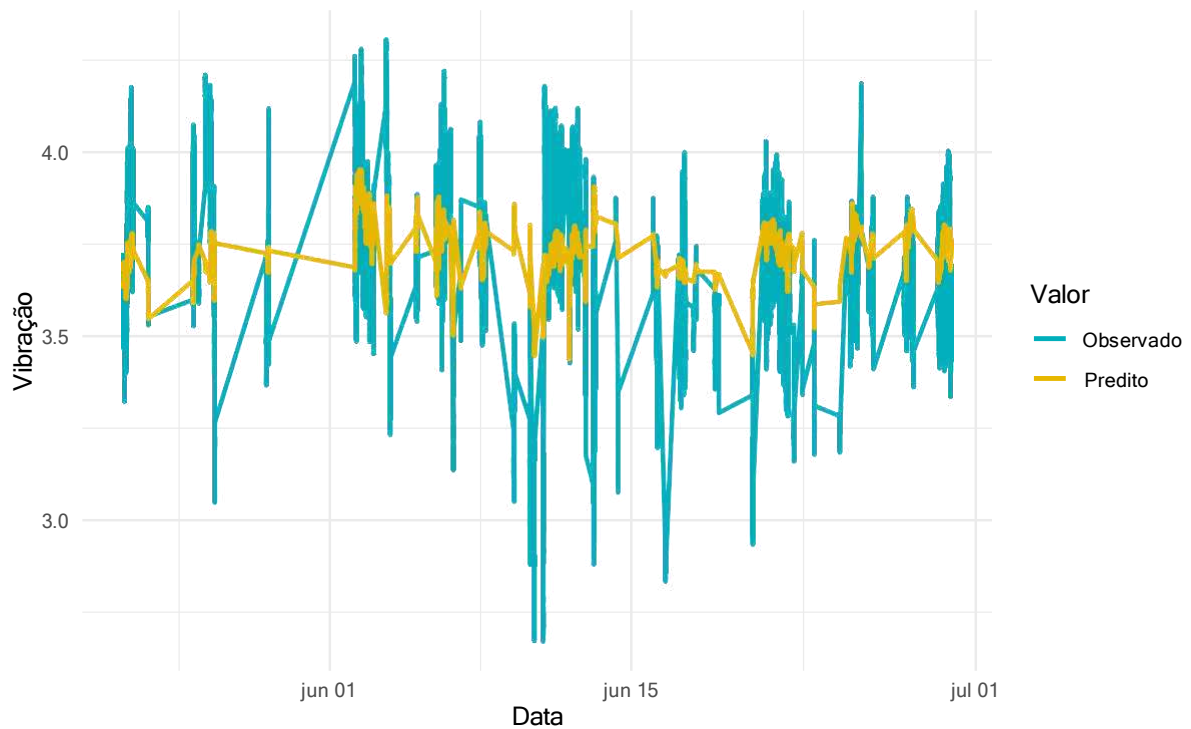
Fonte: AUTORA (2023).

6.4.4 Predição com modelo linear

Aqui o modelo de regressão linear múltipla é usado com o objetivo de prever a variável Vibração. Para isso foram utilizados dados desde outubro de 2022 até julho de 2023. Como muitos valores foram descartados, devido filtros, períodos em que não foi adicionado a clínquer B e demais remoções devido a aplicação de média móvel e *Lags*, o total de valores utilizados aqui foi de 80959 observações. Destas, os primeiros 75% dos valores foram utilizados para a estimação dos parâmetros do modelo. Os demais (25 %) finais foram deixados para testar a predição. O modelo foi ajustado usando as configurações de *Lags* e médias móveis mostradas na Tabela 4, assim como as variáveis preditoras utilizadas foram as que são vistas nesta tabela.

A Figura 26 mostra o gráfico de valores preditos para a variável vibração, em amarelo, e os valores observados para o mesmo período, em azul. Apesar de muitos relacionamentos aparentemente não serem lineares, este gráfico mostra que o modelo consegue captar as tendências de aumento ou redução dos valores de vibração. No entanto, é visível que as estimativas devem ser melhoradas. O baixo desempenho do modelo se dá devido a existência de correlações espúrias, além da falta de linearidade entre algumas variáveis e a variável Vibração.

Figura 26 – Gráfico para os valores observados e preditos de vibração, para a amostra de teste.



Fonte: AUTORA (2023).

6.4.5 *Análise para valores com baixa variabilidade de alimentação total*

Como existe a interferência dos operadores do moinho no que diz respeito ao aumento ou redução da produção, aqui é realizada uma análise para valores de alimentação total quase constante. O objetivo é mitigar o efeito da interferência do operador nas correlações existentes entre as variáveis de entrada e a vibração do moinho. Para isto, foi utilizado um filtro para considerar valores de alimentação total entre 72 e 80 t/h.

Com esse novo filtro aplicado, uma nova análise foi realizada para estudo de defasagem e média móvel. As Tabelas 5 e 6 mostram os resultados do estudo de defasagem e média móvel para os dois tipos de correlações consideradas. É possível perceber nestas tabelas que os resultados para as componentes da alimentação divergem menos para o correlação mutua. Assim, tendo em vista o estudo anterior, para todas as alimentações, foi considerado para estas variáveis lag com valor 5 para o ajuste do modelo. Para as demais variáveis foram consideradas as estimativas oferecidas pela correlação mutua, por serem mais condizentes com a realidade da planta. Os resultados finais considerados para esta análise estão descritos na Tabela 7 .

Tabela 5 – Valores máximos de correlação de Pearson, juntamente com a quantidade de amostras para média móvel e valor de defasagem em lags com baixa variabilidade de alimentação total.

Variável	Média Móvel	Lag	Correlação de Pearson
VIBRAÇÃO	10	0	1
COMPOSIÇÃO	20	10	-0,21
CLÍNQUER	20	6	0,16
GESSO	1	0	-0,15
CALCÁRIO	20	5	-0,14
CLÍNQUER B	1	6	-0,04
PRESSÃO DE MOAGEM	12	7	0,10
INJEÇÃO DE ÁGUA	20	10	0,10
ROTAÇÃO DO CLASSIFICADOR	1	9	0,16
POTÊNCIA DA MESA	20	10	-0,13
TEMPERATURA DE ENTRADA DO MOINHO	1	10	0,07
TEMPERATURA DE SAÍDA DO MOINHO	2	10	0,06
%DA01	1	10	-0,25
%DA02	1	10	-0,19
DIF. DE PRESSÃO DO MOINHO	1	0	-0,14
DIF. DE PRESSÃO DO FILTRO PRINCIPAL	2	0	0,06

Tabela 6 – Valores máximos de correlação mutua, juntamente com a quantidade de amostras para média móvel e valor de defasagem em lags com baixa variabilidade de alimentação total.

Variável	Média Móvel	Lag	Correlação Mutua
COMPOSIÇÃO	20	4	0,55
CLÍNQUER	20	5	0,45
GESSO	20	5	0,54
CALCÁRIO	20	8	0,57
CLÍNQUER B	20	1	0,45
PRESSÃO DE MOAGEM	20	8	0,53
INJEÇÃO DE ÁGUA	19	3	0,52
ROTAÇÃO DO CLASSIFICADOR	18	1	0,53
POTÊNCIA DA MESA	20	5	0,35
TEMPERATURA DE ENTRADA DO MOINHO	20	1	0,40
TEMPERATURA DE SAÍDA DO MOINHO	20	9	0,39
%DA01	4	6	0,58
%DA02	4	2	0,56
DIF. DE PRESSÃO DO MOINHO	16	4	0,53
DIF. DE PRESSÃO DO FILTRO PRINCIPAL	18	2	0,48

Tabela 7 – Valores estimados para quantidade de amostras para a média móvel e valor de defasagem em lags com baixa variabilidade de alimentação total.

Variável	Média Móvel	Lag
COMPOSIÇÃO	15	5
CLÍNQUER	20	5
GESSO	20	5
CALCÁRIO	20	5
CLÍNQUER B	20	5
PRESSÃO DE MOAGEM	20	8
INJEÇÃO DE ÁGUA	19	3
ROTAÇÃO DO CLASSIFICADOR	18	1
POTÊNCIA DA MESA	20	5
TEMPERATURA DE ENTRADA DO MOINHO	20	1
TEMPERATURA DE SAÍDA DO MOINHO	20	9
%DA01	4	6
%DA02	4	2
DIF. DE PRESSÃO DO MOINHO	16	4
DIF. DE PRESSÃO DO FILTRO PRINCIPAL	18	2

A Figura 27 mostra as correlações de Pearson para os dados sem aplicação de média móvel e lag (A) e após a aplicação desses elementos (B). É visto que desta vez as correlações são mais realísticas, ou seja, são mais condizente com o comportamento do moinho em operação normal. Pois é sabido que ao aumentar a quantidade de clínquer na receita do cimento, o moinho tende a aumentar a vibração. Assim, é esperado ter uma correlação positiva desta variável com a vibração do moinho, como agora é mostrado na matriz de correlação. Ademais, as variáveis Rotação do classificador e Calcário também apresentaram uma correlação com maior veridicidade.

Quando se trata da correlação entre as variáveis explicativas, nota-se o aumento da correlação da variável %DA01 com a variável Diferencial de pressão do moinho, o que é realístico, pois sempre que aumenta-se a porcentagem de abertura do *damper 01*, é aumentado as pressões na entrada e saída do moinho, devido uma maior força de arraste ou sucção dos gases. Porém, houve uma mudança que não condiz com a realidade em relação a correlação da variável %DA01 com o Diferencial do filtro principal, devendo a mesma ser positiva visto que ao aumentar a abertura do *damper 01*, a quantidade de particulados no filtro também aumenta devido a elevação da capacidade de exaustão dos gases retirando mais rapidamente o material de dentro do moinho vertical. Portanto, muito embora algumas relações tenham melhorado, percebe-se que isso ocorre provavelmente devido a relação entre as variáveis não serem linear.

Figura 27 – Correlação de Pearson entre a Vibração e cada variável explicativa.

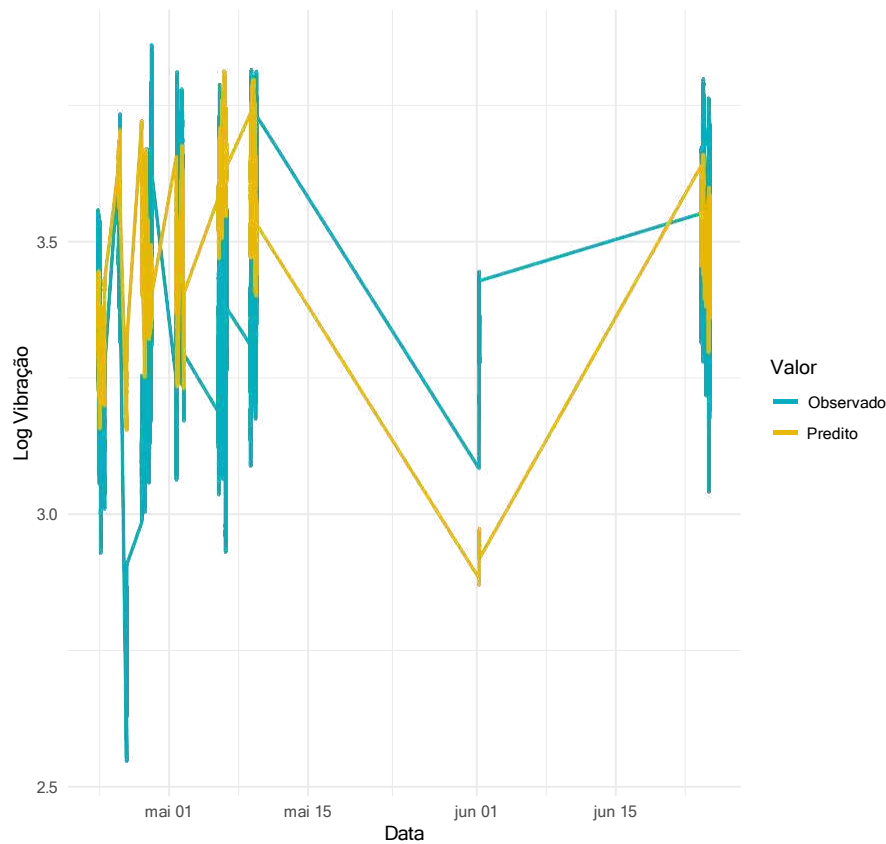


Fonte: AUTORA (2023).

O gráfico mostrado na Figura 28 fornece evidências para um modelo mais bem ajustado, pois os valores preditos na amostra de teste estão mais próximos dos valores observados da variável. Neste modelo foi possível incluir as variáveis que compõem a alimentação total, pois estas se mostraram significativas no modelo. Na análise anterior elas não se mostraram significativas no modelo e tiveram que ser retiradas. Nesta última análise a variável Composição foi particularmente útil, pois existe variação para os seus valores, tendo em vista que sua construção não se baseia somente na soma dos valores que compõem a alimentação total. Ademais, a variável %DA02 foi retirada devido a alta correlação com as variáveis Diferencial de pressão do moinho e %DA01.

Esta modelagem pode ser muito melhorada, caso a interferência do operador seja completamente neutralizada, e com a inclusão de um modelo capaz de captar os relacionamentos não lineares existentes entre as variáveis de entrada e a variável resposta (Vibração). Neste trabalho, foi analisado apenas o cimento CP II F - 32, entretanto, um comportamento similar é esperado para os demais tipos de cimento.

Figura 28 – Gráfico para os valores observados e preditos de vibração, para a amostra de teste, para dados com pouca variação de alimentação total.



Fonte: AUTORA (2023).

Tabela 8 – Métricas de avaliação do modelo.

	Estimativa	Desvio padrão	t valor	Pr(> t)
(Intercept)	3,5539	0,2068	17,19	0
Composição	-12,2543	1,6821	-7,29	0
Clínquer	0,0407	0,0020	20,82	0
Clínquer B	-0,0136	0,0021	-6,40	0
Gesso	0,0598	0,0160	3,74	0,0002
Calcário	0,2398	0,0219	10,93	0
Pressão de moagem	0,1336	0,0034	38,78	0
Injeção de água	0,0002	0	20,34	0
Rotação do classificador	0,0019	0	49,09	0
Potência da mesa	-0,0008	0	-46,98	0
Temperatura de entrada do moinho	-0,0136	0,0002	-55,31	0
Temperatura de saída do moinho	0,0143	0,0005	26,38	0
%DA01	-0,0447	0,0011	-39,45	0
Diferencial de pressão do moinho	0,0189	0,0009	21,25	0
Diferencial de pressão do filtro principal	0,0073	0,0009	7,95	0

Pelo exposto aqui, recomenda-se que as análises sejam verificadas com um *range*

de alimentação total quase constante, para evitar as interferências do operador(a) do painel de controle com o acréscimo ou redução de produção prevenindo que haja correlações espúrias e divergências no momento da predição com o modelo. Se for possível a separação dos dados de operação regular sem influências do operador, pode-se obter dados consistentes para serem analisados, sem que haja necessidade de interromper a operação normal do moinho para que este opere com foco em coleta de dados.

7 CONCLUSÃO

Em síntese, este trabalho apresenta um estudo das principais variáveis que afetam a vibração do corpo de um moinho vertical com afinco. Esse conhecimento é obtido a fim de criar estratégias para minimizar os efeitos sofridos por uma operação não estável. Pois estes levam a um maior consumo de energia e desgaste excessivo do moinho vertical, afetando principalmente a solda da mesa do moinho, das capas dos rolos e as soldas da estrutura que suporta os seus rolos. Assim, a elaboração deste estudo acarretou em um melhor discernimento sobre as variáveis de operação de um moinho vertical de rolos que produz cimento e também sobre uma alternativa para realização da coleta dos dados para treinamento de um modelo de previsão para a vibração. Deste modo, foram utilizadas técnicas de análise de dados tais como a regressão linear múltipla, o lag ou delay e a média móvel.

Partindo disto, foi realizada a montagem de uma base de dados e apresentada uma análise inicial e exploratória. Em seguida, o modelo de regressão foi usado para investigar a influência de diversas variáveis na vibração do moinho. Entretanto, nota-se que com longos períodos de tempo de operação do moinho ocorrem interferências do operador do centro de comando do moinho. Estes atuam no aumento ou redução da produtividade, a fim de minimizar vibrações, o que gera correlações espúrias, interferindo assim na aplicação do modelo de predição.

Ademais, a coleta de dados por ser realizada no período de outubro de 2022 à julho de 2023, abrange diversas mudanças de receitas na operação do moinho, em que neste trabalho as conclusões foram tomadas na produção do cimento CP II F - 32. Porém, pode-se abranger a análise realizada para todos os tipos de cimento. Além do mais, é possível realizar melhorias na modelagem utilizando um modelo que consiga assimilar as relações que não são lineares entre as variáveis explicativas e a resposta, além de levar em consideração a dependência que existe entre as coletas, e que não é tratada no modelo usado aqui. Estas análises não foram realizadas neste estudo, devido a falta de tempo hábil, e serão deixadas aqui como trabalhos futuros. Tendo em vista todas as questões abordadas aqui, é possível que um modelo de aprendizado profundo possa obter melhores resultados.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Cimento portland - requisitos. ABNT, Rio de Janeiro, 2018.
- AITCHISON, J. The statistical analysis of compositional data. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, Wiley Online Library, v. 44, n. 2, p. 139–160, 1982.
- FATAHI R., N. H. D. E. Modeling of energy consumption factors for an industrial cement vertical roller mill by shap-xgboost: a "conscious lab" approach. *Scientific Reports*, 5 2022.
- FLSMIDTH. Cf raw meal silo. FLSmidth, 2011.
- FLSMIDTH. Moinho de cimento vertical de rolos ok. FLSmidth, 2015.
- GERRY. **Portland Cement**. [S. l.]: ICE Publishing, 1999. v. 3.
- HOFFMANN, R. Análise de regressão - uma introdução à econometria. Editora HUCITEC, v. 4 ed, 2006.
- ITAMBE. Cimento: fabricação e características. material interno. CIA. DE CIMENTO ITAMBÉ, 2002.
- NETO, F. das C. S. Acompanhamento do processo produtivo do cimento portland e avaliação da cogeração de energia na unidade fabril da companhia industrial de cimento apodi em quixeré-ce. Universidade federal rural do semi-árido, Mossoró/RN, 2018.
- PAREEK, V. S. S. P. Review on vertical roller mill in cement industry its performance parameters. *Materials Today: Proceedings*, v. 44, 2021.
- PEARSON, K. Notes on the history of correlation. **Biometrika**, JSTOR, v. 13, n. 1, p. 25–45, 1920.
- ROBERTS, A.; ROBERTS, J. **Multiple Regression: A Practical Introduction**. SAGE Publications, 2020. ISBN 9781544358826. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=UsoOEAAAQBAJ>.
- RODRIGUES, D. C. Q. Modelagem matemática de um forno rotativo empregado na produção de clínquer. *Cerâmica, Espírito Santo*, v. 59, n. 350, 2013.
- SAKIA, R. M. The box-cox transformation technique: a review. **Journal of the Royal Statistical Society Series D: The Statistician**, Oxford University Press, v. 41, n. 2, p. 169–178, 1992.
- SNEE, R. D. Validation of regression models: methods and examples. **Technometrics**, Taylor & Francis, v. 19, n. 4, p. 415–428, 1977.
- TISOC, M.; BELTRÁN, J. V. Mutual information: A way to quantify correlations. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 44, 2022.
- UBE. Ube vertical mill. UBE machinery corporation,LTD., 1980.
- VARELLA, J. Critérios de seleção de britadores aplicados ao processamento mineral. XXIV ENTMME, Salvador, 2011.
- ZHU YANGJIAN JI, Z. Z. Y. S. M. A data-driven decision-making framework for online control of vertical roller mill. *Computers Industrial Engineering*, v. 143, 2020.