

**ALTIERES MARÇAL FRADE**

Análise multivariada para estudo de um processo industrial de  
concentração de minério de ferro

Belo Horizonte, Minas Gerais  
Instituto de Ciências Exatas da UFMG  
Departamento de Estatística

**ALTIERES MARÇAL FRADE**

Análise multivariada para estudo de um processo industrial de  
concentração de minério de ferro

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Estatística do Departamento de Estatística do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do Título de Especialista em Estatística.

Orientador: Professor Dr. Luiz Henrique Duczmal

Belo Horizonte, Minas Gerais  
Instituto de Ciências Exatas da UFMG  
Departamento de Estatística

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, meu muito obrigado a Deus, por toda a minha realidade.

Meus agradecimentos também a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho. O desenvolvimento desta pesquisa só foi possível pela existência de um grupo de pessoas que, de forma direta ou indireta, ajudaram-me a concebê-lo.

As pessoas diretamente ligadas à execução deste trabalho sabem e vivenciaram comigo os momentos mais delicados para a construção dele: a minha querida família, o elo forte que me faz ver através da janela das infinitas possibilidades que o mundo conjuga como importante para a rotina das pessoas. Para elas, os meus agradecimentos serão por toda a minha existência.

Meus agradecimentos a minha querida esposa Priscilla que entendo ser uma benção em minha vida e que, com gestos ternos, me mostra sempre o caminho para uma vida melhor.

Agradeço a minha amada mãe Clandira, que é a prova de que o bem mais precioso é o amor, e ao meu irmão Afonso: eles são os pilares titânicos de nossa família. Com eles, compartilho verdadeiras experiências de duras e contínuas batalhas, mas que nem por isso nos fizeram desistir de nenhuma delas.

Meus grandes colegas de trabalho merecem também todo o meu reconhecimento pela rotina do dia a dia, pois fazem realizações incríveis em uma dimensão que não é compreendida por grande parte da sociedade, propensa a rejeição a mineração. A eles, meus agradecimentos por toda a ajuda nas determinações laboratoriais, resultados de experimentos e oportunidade valiosa de execução deste trabalho.

Por fim, agradeço aos brilhantes Professores Luiz Duczmal, a quem admiro pela energia e sabedoria, e Roberto Quinino, que em suas aulas abriu um novo mundo em minha vida. As qualidades destes dois grandes mestres são capazes de renovar o espírito de querer descobrir mais e engajar a continuar a pesquisar e aprofundar na ciência estatística.

## RESUMO

Em processos industriais, os padrões e qualidades dos produtos podem ser avaliados com base em várias respostas do processo. A partir de condições pré-determinadas do processo, deve-se garantir padrões estabelecidos para as matérias primas, evitando-se variações significativas, motivo pelo qual devem ser controlados desempenho e qualidade ao longo de toda a cadeia de produção.

Dentro do processo, podem ser encontradas centenas de variáveis explicativas, com respectivos níveis adotados, ou naturalmente estabelecidos. Em função destas inúmeras possibilidades, a avaliação e obtenção de respostas de processos tornam-se mais difíceis.

No caso da indústria da mineração, que é dotada de complexos sistemas de valorização das reservas minerais, originando produtos que constituirão matérias primas para as mais diversas indústrias de base, nos deparamos com processos e sistemas tão complicados como os de qualquer outra indústria. Assim, os processos de valorização de reservas minerais são difíceis de lidar em termos de variabilidade dos minérios que alimentam as usinas e escala de massa processada. Nestes processos, as variáveis explicativas podem chegar facilmente às centenas, às quais são ligadas a uma mesma resposta de processo.

O estudo de caso, aqui apresentado, é relativo ao processo industrial de uma empresa de mineração de minério de ferro no município de Itabirito, em Minas Gerais, na qual o processo industrial conta com diversas operações unitárias, ou etapas de processamento.

Neste trabalho, foi avaliado o sistema produtivo de bens minerais, dedicado à produção de insumos para a indústria siderúrgica. Este sistema produtivo realiza a concentração do mineral útil (minerais de ferro, hematita ou goethita, por exemplo) para obtenção de ferro metálico. Uma das ferramentas estatísticas utilizadas foi a análise multivariada (k-médias), a qual foi direcionadora de testes de laboratório para validar hipóteses formuladas ao longo das análises de processo e de melhorias no padrão industrial.

O problema focado foi a produção de produto mineral, que mateira prima para obtenção de ferro metálico, com um nível do contaminante sílica acima do especificado pelo cliente, consistindo em uma falha de produção (defeito). Esta

falha leva a uma perda de produção, pois o produto com alto nível de contaminante é segregado, afetando, diretamente, o resultado final da empresa, sua receita e o atendimento aos clientes.

O objetivo deste trabalho, portanto, consistiu em identificar as prováveis causas de contaminação do produto, visando evitar que a falha ocorra e, conseqüentemente, promover maior recuperação da massa de mineral útil como produto.

Para a base da avaliação, foi elaborado o mapeamento do processo industrial visando a extração das informações pertinentes para organização do banco de dados e seu conteúdo. As informações disponíveis no banco de dados foram provenientes de centenas de sensores distribuídos nos diversos equipamentos da usina, bem como de resultados de amostragens periódicas realizadas na planta industrial, as quais são insumos para a determinação química e física do minério em fluxos de entrada e saída dos processos de usina.

Esta etapa do estudo permitiu a visualização das respostas de cada processo com as variáveis explicativas correspondentes.

O processo industrial responsável pela resposta associada ao teor de contaminante sílica no produto é associado a pelo menos 50 variáveis. Para controlar estas variáveis, diversas ações são requeridas, perpassando desde atividades realizadas automaticamente pelos equipamentos até a aplicação de ferramentas estatísticas para obtenção dos melhores parâmetros de processo.

As análises realizadas permitiram concluir que o controle de tal processo é complicado de ser avaliado rapidamente através somente dos sentidos dos técnicos de processos, até mesmo dos mais experientes. Justifica-se então a necessidade de adoção de um direcionamento metodológico completo para diligenciar ações que alterem os parâmetros das variáveis e permitam a melhoria do processo.

**Palavras-chave:** Mineração, análise multivariada, flotação, minério de ferro, controle de processo, estabilidade de processo, hematita, sílica, recuperação em massa.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Principais jazidas de minério de ferro no planeta</i>	2
<i>Figura 2: Exemplo de formação ferrífera bandada – BIF</i>	3
<i>Figura 3: Exemplo de mina</i>	4
<i>Figura 4: Fluxo geral de produção do aço</i>	5
<i>Figura 5: Ciclo de Reposta do Controle de Processo</i>	7
<i>Figura 6: Aparência do produto Pellet Feed</i>	11
<i>Figura 7: Pelotas produzidas após o processo pré-metalúrgico</i>	12
<i>Figura 8: Produto pellet feed com níveis de contaminante diferentes</i>	13
<i>Figura 9: Sequência de estudos, formulação de hipóteses e comprovação das causas ligadas aos desvios de qualidade do produto pellet feed</i>	20
<i>Figura 10: Mapa de processo</i>	22
<i>Figura 11: Fluxograma de processo</i>	23
<i>Figura 12: Exemplo de arquitetura de banco de dados adotado neste trabalho</i>	24
<i>Figura 13: Equipamento de flotação em bancada</i>	27
<i>Figura 14: Equipamento de flotação industrial</i>	27
<i>Figura 15: Fluxo de testes de flotação em bancada.</i>	28
<i>Figura 16: Resumo estatístico para a distribuição de dados para a contaminante sílica no produto</i>	29
<i>Figura 17: Carta de controle para dados históricos de sílica no produto</i>	30
<i>Figura 18: Carta de controle para dados históricos de manganês no produto</i>	31
<i>Figura 19: Carta de controle para dados históricos de alumina no produto</i>	32
<i>Figura 20: Carta de controle para dados históricos de óxido de magnésio no produto</i>	32
<i>Figura 21: Resultado do tratamento dos dados industriais no software Minitab</i>	33
<i>Figura 22: Saída do software Minitab mostrando os oito vetores que resumiriam os dados do processo industrial de beneficiamento minera.</i>	34
<i>Figura 23: Valor de contaminante no produto após simulação laboratorial de concentração mineral do minério de ferro</i>	39
<i>Figura 24: Resultados de sílica no produto após tratamento com diversos reagentes químicos</i>	40

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Produção Mundial por país entre 2011 e 2015 em milhões de toneladas - até 90% da produção mundial</i>	2
<i>Tabela 2: Variáveis de processo de beneficiamento mineral, usina de concentração de minério de ferro</i>	19
<i>Tabela 3: Variáveis químicas de beneficiamento mineral, usina de concentração de minério de ferro</i>	19
<i>Tabela 4: Resultado do tratamento dos dados através de k-médias</i>	35
<i>Tabela 5: Teores alvos para amostragem de minérios para comprovação em laboratório dos efeitos dos contaminantes na resposta sílica no produto</i>	37
<i>Tabela 6: Amostras coletadas em usinas</i>	38
<i>Tabela 7: Resultado químico após testes de bancada (laboratório) para cada tipo de minério coletado</i>	38

## SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
2 – PROBLEMATIZAÇÃO .....	9
3 – JUSTIFICATIVA.....	14
4 – OBJETIVO.....	14
5 – REVISÃO DA LITERATURA.....	15
6 – METODOLOGIA DA PESQUISA.....	18
7 – ANÁLISES DESCRITIVAS DOS DADOS .....	28
8 – APLICAÇÃO DO ALGORITMO K-MÉDIAS .....	33
9 – RESULTADOS DOS TESTES DE LABORATÓRIO .....	37
10 – CONCLUSÕES.....	40
APÊNDICE .....	43
GLOSSÁRIO .....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50



## 1 – INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

A obtenção de ferro metálico para as mais variadas aplicações é realizada a partir de minerais que contêm este elemento ou sucatas, após processo de reciclagem. Relativo à mineração, apesar do elemento ferro estar presente em grande parte da crosta terrestre, sua “exploração”, ou lavra com ganho econômico, é feita em depósitos minerais que têm grande concentração de minerais que o contenham em suas redes cristalinas. As rochas portadoras dos minerais de ferro e que são exploradas na indústria são chamadas de minério de ferro.

O contexto mundial e histórico de produção de minério de ferro tem relação direta com as necessidades sociais, devido ao crescimento das populações mundiais. Como resultado, sua produção é estratégica e está na base da indústria atual.

Um exemplo da importância do ferro e, indiretamente, do minério de ferro, é dado por Michael Jébrak, que cita que o fornecimento de minério de ferro para a Alemanha nazista foi cortado estrategicamente pelos aliados, os quais dominaram a logística deste bem pela rota invernal do ferro (rota pela qual era transportado o minério de ferro da mina de Kiruna, na Suécia, ao mar Báltico). A consequência do desabastecimento deste bem mineral seria a dificuldade de produção de materiais bélicos por parte daquele país.

As principais jazidas de minério de ferro, conforme pode ser visualizado na Figura 1, estão localizadas no Brasil, Rússia, África do Sul e Austrália.

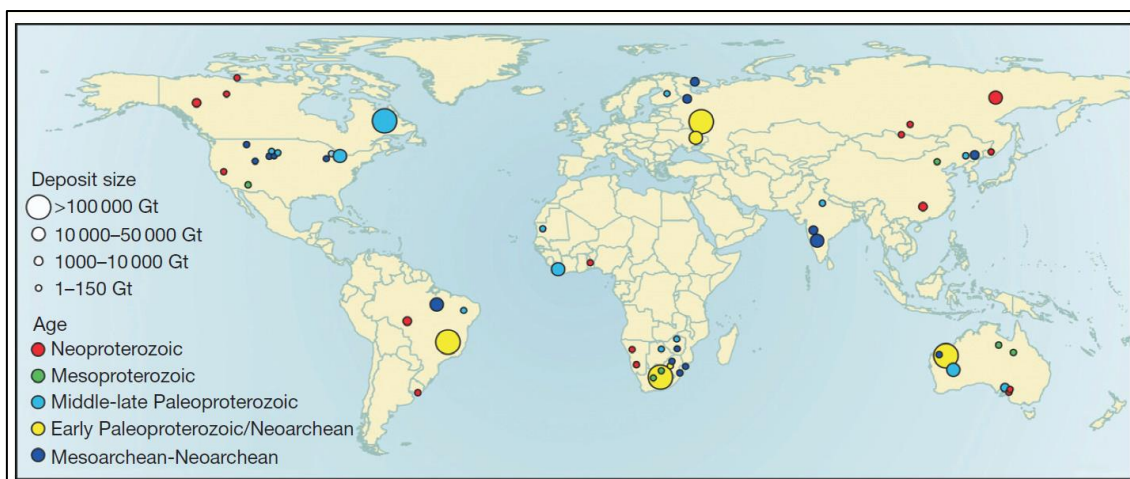


Figura 1: Principais jazidas de minério de ferro no planeta. Extraído Sedimentary Hosted Iron Ores, E.R. Ramanaidou; M.A. Wells, 2013, página 317.

A Tabela 1 apresenta a produção mundial de minério de ferro entre os anos de 2011 e 2015.

Tabela 1: Produção Mundial por país entre 2011 e 2015 em milhões de toneladas - até 90% da produção mundial - Editado do relatório do serviço geológico ianque extraído do site [https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron\\_ore/index.html#myb](https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_ore/index.html#myb) em 19 de jul 2018

Produção mundial de minério de ferro (milhões de toneladas)						
(Representação de aproximadamente 90% da produção do planeta)						
País	2011	2012	2013	2014	2015	Participação
<b>Total</b>	1.816	1.844	1.974	2.050	2.077	2015 (%)
<i>Austrália</i>	488	556	683	774	817	39,3
<i>Brasil</i>	398	401	386	385	397	19,1
<i>China</i>	442	420	417	410	375	18,0
<i>Índia</i>	169	137	152	129	156	7,5
<i>Rússia</i>	104	104	102	102	101	4,9
<i>África do Sul</i>	58	67	72	81	73	3,5
<i>Ucrânia</i>	66	66	67	68	67	3,2
<i>EUA</i>	56	55	53	56	46	2,2
<i>Canadá</i>	36	39	42	44	46	2,2

Voltando a atenção para como o minério de ferro é encontrado na natureza, pode-se se orientar pela definição geológica das rochas portadoras dos minerais de ferro. Em geologia, as rochas alvo de exploração de minério de ferro são conhecidas pela sigla em inglês “BIF”, ou *Banded Iron Formation*, o que significa que as rochas são formadas por bandamentos, ou acamadações, entre camadas de minerais de ferro e camadas do mineral quartzo, assim, durante milhões de anos camadas de minerais de ferro e de quartzo foram sendo

depositadas uma após a outra. A Figura 2 fornece um exemplo de como este arranjo é encontrado na natureza.

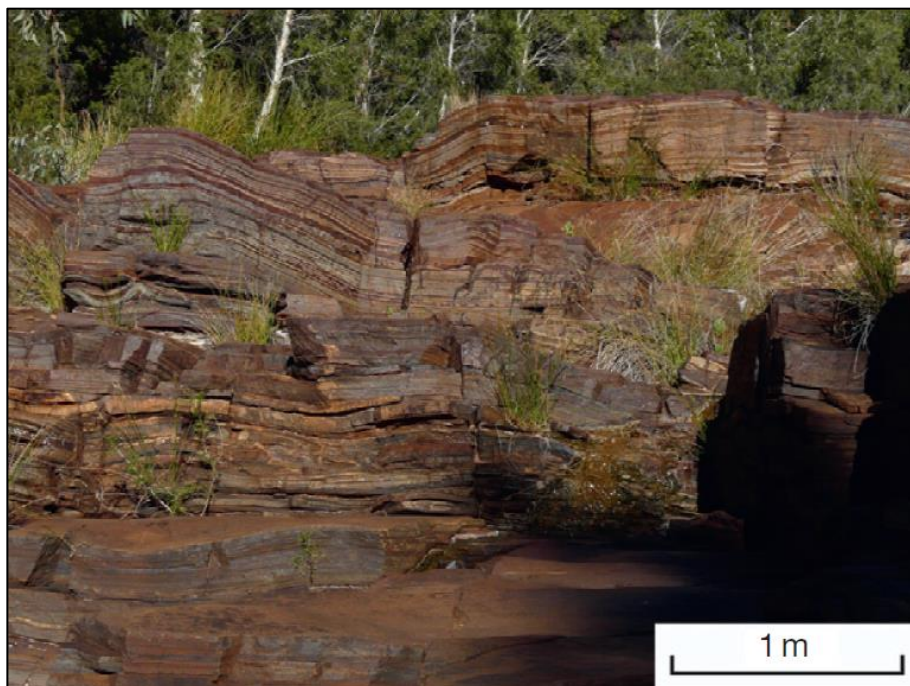


Figura 2: Exemplo de formação ferrífera bandada – BIF. Extraído de *Sedimentary Hosted Iron Ores*, E.R. Ramanaidou; M.A. Wells, 2013, página 319.

A cadeia produtiva do minério de ferro começa nas minas, onde, atualmente, se utilizam equipamentos de lavra e transporte de grande porte como retroescavadeiras e caminhões “fora de estrada”, com grande capacidade de carga. As retroescavadeiras têm como objetivo a retirada das rochas “*in situ*” e o carregamento do minério nos caminhões. Estes últimos têm como destino as usinas de valorização do minério, ou como também conhecidas na indústria mineral brasileira, usinas de tratamento ou beneficiamento mineral.

Por valorização do minério de ferro, entende-se como a aplicação de processos e técnicas para a regularização mineralógica e de tamanhos das partículas deste bem mineral.

A Figura 3 mostra um exemplo de uma mina de minério de ferro.



Figura 3: Exemplo de mina. Fonte <https://www.bhp.com/-/media/documents/investors/annual-reports/2018/bhpsustainabilityreport2018.pdf?la=en>, acessado em 06 março 2019.

A entrega de produtos – minério de ferro - padronizados no que se refere às suas características físicas e químicas é fundamental para garantir uma produtividade eficiente na indústria metalúrgica. A Figura 4 mostra um fluxograma simplificado da produção do aço.

A regularização de tamanhos das partículas garante aos clientes dimensões dos grãos que os permitirão operacionalizarem os processos metalúrgicos minimizando problemas como, por exemplo, de alto gasto de combustível e energético, já que a alimentação nestes processos por partículas menores do que as de especificação, podem ocasionar uma redução na permeabilidade do leito de carga do alto forno, com conseqüente redução na produtividade, exigindo um consumo maior de agente redutor (carvão mineral) para compensar esta falha.

Com relação ao custo com energia, a regularização química também é tão importante quanto à de tamanhos de partículas, pois quanto maior o teor de ferro nos produtos das usinas de beneficiamento, menor o custo por unidade de metal produzido. A presença de contaminantes no minério (sílica) ocasiona a

produção de maior quantidade de escória (rejeito da metalização de ferro) no processo e, conseqüentemente, também reduz a produtividade.

É importante salientar que os gastos energéticos e de combustíveis são as variáveis acompanhadas regularmente para a maximização de ganho financeiro das empresas siderúrgicas. Se o gasto de combustível e energético é muito grande, por conta do padrão dos produtos minerais, a receita das indústrias siderúrgicas, como são conhecidas as industriais metalúrgicas de metalização de ferro, conseqüentemente, será reduzida.

Dessa forma, as usinas de beneficiamento de minério de ferro possuem operações que têm como objetivos a regularização dos tamanhos das partículas e a concentração de minerais de ferro nos produtos, e conseqüentemente, de ferro, através da separação/concentração mineral.

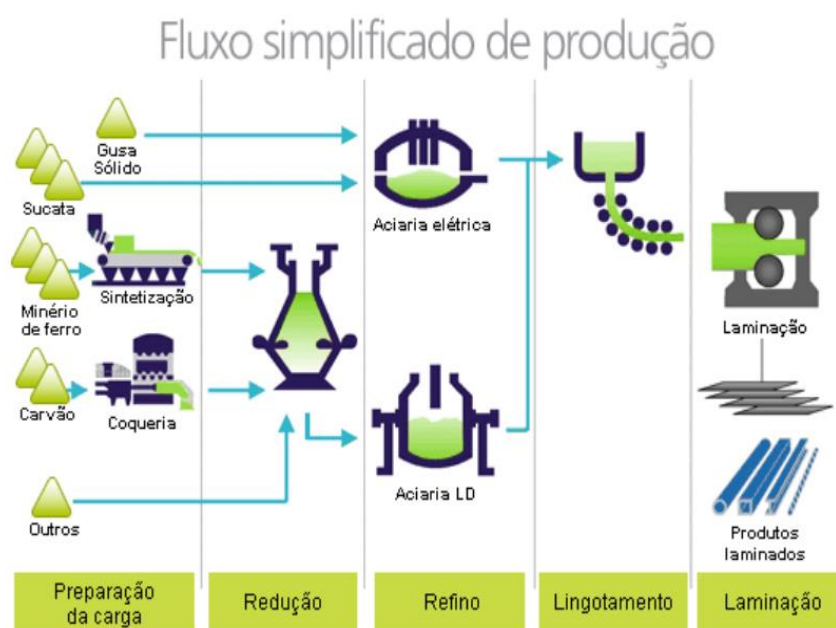


Figura 4: Fluxo geral de produção do aço. Fonte: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html> em 24/11/2018 as 12h00min.

Conforme já mencionado, o minério de ferro é composto em grande parte por minerais de ferro e de sílica. Em geral, os minérios explorados nas minas do estado de Minas Gerais têm teores de ferro total<sup>1</sup>(Fe<sup>0</sup>) entre 40% e 55%. Como

<sup>1</sup> Em geral, mede-se em um minério de ferro o ferro total elementar (Fe<sup>0</sup>) contido na massa mineral, em relação à quantidade total de mineral hematita, que tem a fórmula química Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Pode-se encontrar uma faixa de teor de hematita entre 57% e 79%, aproximadamente, sem considerar outros tipos de contaminantes, nos minérios de ferro do estado de Minas Gerais.

a sílica é composta dos elementos silício e oxigênio, não sendo aproveitada na siderurgia, é considerada como impureza e, por este motivo, é retirada do minério ferro nas usinas e disposta como rejeito.

Deste modo, para a concentração dos minerais de ferro nos produtos, a indústria busca a separação/concentração da sílica, com a posterior segregação deste contaminante.

O processo de beneficiamento de minério de ferro em planta industrial é constituído por diversas outras operações unitárias como britagens de partículas, classificação de partículas por tamanhos, concentração mineral, entre outras. Estas operações têm índices de desempenho que ajudam as indústrias a os otimizarem.

Estes índices são calculados através dos valores das variáveis de processos, as quais são medidas através de sensores instalados nas usinas de beneficiamento. Para o controle de desempenho, é necessário um padrão industrial que contemple sensores e atuadores para a operação de toda a usina.

Além destes elementos, demanda-se também um sistema que registre o histórico de todas as informações de desempenho da usina. Este histórico é geralmente armazenado por dois anos.

Em caso de desvios de desempenho, podem ser feitas intervenções de processo através de mecanismos atuadores – motores e válvulas – que alteram os fluxos, as dosagens de reagentes, as quantidades de massa mineral tratada nestes processos buscando a maximização de desempenho.

A Figura 5 demonstra como é o fluxo de controle de processo nas usinas de beneficiamento.



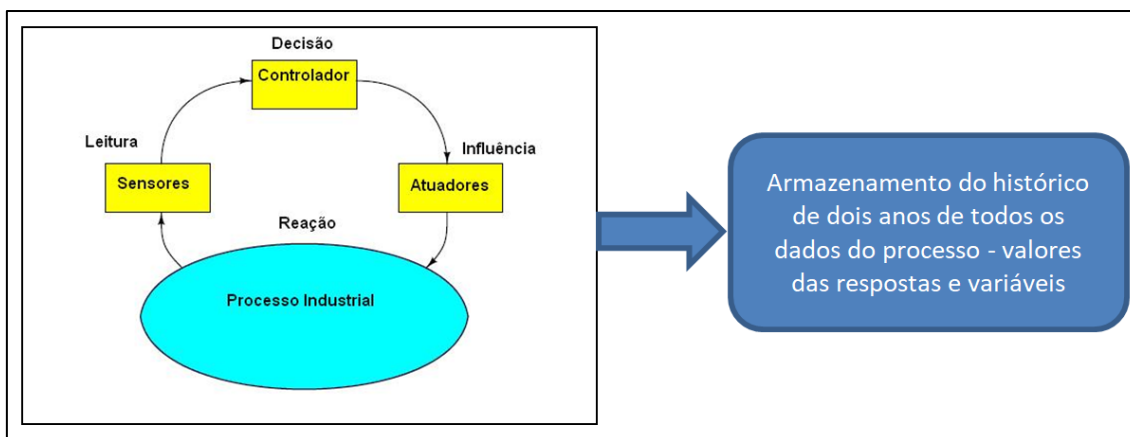


Figura 5: Ciclo de Reposta do Controle de Processo. Adaptado de *Lessons in industrial instrumentation*, Kuphaldt T. R..

O sistema que traz o histórico de dados permite ao corpo de analistas avaliar anomalias, desempenhos e falhas no processo que levarão, ou poderão levar a falhas de produção, sejam estas falhas relacionadas à quantidade de massa produzida, ou à qualidade requerida.

As diversas plantas industriais para o tratamento de minério de ferro espalhadas pelo mundo têm arranjos industriais particulares, consequentes da sua localização e da qualidade do minério que ali se encontra, promovendo diferentes tipos de arranjos das operações unitárias. Isto se deve ao fato do minério de ferro localizado em uma parte do mundo ser diferente de outro devido à sua gênese, ou, resumidamente, ao ambiente geológico de gênese do minério de ferro, o qual atribuiu a ele diferentes propriedades físicas, químicas e mineralógicas.

Assim, a concepção de uma usina de beneficiamento de minério de ferro depende das propriedades do minério, o que demanda uma série de estudos de engenharia para a caracterização de tais propriedades. Estes estudos recebem o nome de caracterização tecnológica e detalham todas as propriedades para o planejamento de quais serão as operações de beneficiamento que resultarão na maximização de receita financeira da indústria mineral.

A maximização de receita desta indústria depende da maximização de parâmetros de desempenho. Abaixo destacamos os parâmetros que são monitorados ao longo da operação de beneficiamento para a maximização do processo:

- Massa produzida;
- Recuperação em massa;
- Sílica no produto;
- Teor de umidade;
- Parâmetros físicos como, classe de tamanhos de partículas.

Estes parâmetros, ou respostas de processo, permitem a verificação da máxima recuperação como produto da massa mineral, ou mesmo a qualidade química e física resultante do processamento em tempo real.

Assim, a avaliação do padrão industrial é feita pelo acompanhamento constante de variáveis explicativas e respostas. Para determinadas variáveis, o acompanhamento deve ser instantâneo, impedindo que o padrão industrial possa sofrer desvios catastróficos.

Pode-se citar que a forma mais comum de controle e acompanhamento de desempenho das usinas de beneficiamento mineral é feita por sistemas informatizados. Estes sistemas são operados por técnicos em uma central de controle. Nesta central de controle, os técnicos contam com sistemas de comunicação com os operadores e técnicos em campo, sistema de monitoramento *on-line* e circuito fechado de televisão.

Todo o controle, ou intervenção nos processos, são realizados em modo remoto pelos técnicos de central de controle e só são possíveis devido à instrumentação e automação hoje instaladas nos equipamentos industriais.

Atualmente, é possível encontrar centenas de sensores e atuadores instalados nas usinas, um número muito maior do que há uma década atrás. Tal fato se deve à facilitação de acesso devido ao barateamento destes componentes.

A arquitetura de uma usina de beneficiamento mineral é definida para um tipo de minério, o qual foi analisado a partir de amostras retiradas da mina anos antes mesmo da usina ser implantada, ou seja, em fase de pesquisa. Estas amostras retratavam a realidade de uma parte da mina estudada pelos geólogos e engenheiros para projetar a futura usina.

Entretanto, passados vários anos da operação da usina, o padrão de minério que foi utilizado para o projeto pode nem existir mais, fato ligado a um erro relacionado à falta de amostras suficientes (fato que pode estar ligado a falta de amostragem completa da reserva mineral, o mesmo ao erro conhecido como



tipo II), restando na mina minérios completamente diferentes, em suas propriedades físicas e químicas, e que demandam adaptações industriais.

Dessa forma, é muito importante que os engenheiros operacionais acessem históricos recentes do minério que é alimentado nas usinas, como também dos ajustes aplicados para o beneficiamento, para que, de posse de um banco de dados contendo estas informações, possam realizar correções, melhorias e planejar o futuro das operações.

A formatação do banco de dados elege as respostas que se deseja analisar e todas as variáveis explicativas ligadas a estas respostas. Em muitas vezes são utilizadas planilhas eletrônicas para realizar filtros em dados incoerentes e organização dos vetores.

Em sistemas mais avançados, o corpo técnico utiliza computadores que acessam os servidores dedicados ao armazenamento dos dados industriais. Este tipo de sistema melhora a coleta de dados e permite selecionar períodos específicos, estratificando do banco de dados informações ligadas a eventos específicos (falhas, perdas de desempenho e descontrole).

Neste contexto, este trabalho visa apresentar as hipóteses associadas às falhas no desempenho de um processo de concentração mineral de minério de ferro em uma planta localizada no município de Itabirito, Minas Gerais, bem como as ferramentas estatísticas utilizadas para a análise de padrões difíceis de serem determinados por uma simples descrição de dados temporais.

E ainda, avaliar-se-á se o padrão industrial atual seria capaz de sustentar a operação produzindo um produto dentro das especificações de limites de qualidade química, especificamente em relação ao contaminante sílica, considerando sua previsibilidade, mesmo em cenários de alimentação de minérios com diferentes composições químicas.

## 2 – PROBLEMATIZAÇÃO

A mina de minério de ferro que abastece a usina analisada neste estudo possui minérios com características químicas e físicas diferentes em determinadas faixas granulométricas. Por exemplo, para partículas maiores que 6,3 mm, tem-se um teor de ferro de 63% e uma sílica de 2%; a faixa de tamanhos de partículas menores que 6,3 mm e maiores que 0,15 mm, tem um teor de ferro

de 64% e sílica de 1,5% e, finalmente, a faixa de tamanhos abaixo de 0,15 mm tem um teor de 48% de ferro e sílica de 20%. Esta característica é um exemplo de como a natureza geológica pode determinar as características de um minério, o que é peculiar para cada mina, ou reserva mineral.

Devido a característica do minério a concepção do projeto da usina de tratamento mineral objeto deste estudo considera a produção de três produtos: um produto granulado, com a faixa de tamanhos entre 50 mm e 10 mm, produto conhecido como *Lump ore*; outro produto com tamanhos de partículas entre 10 mm e 0,15 mm, chamado de *sinter feed*; e um produto com a faixa de tamanhos menores que 0,15 mm, o *pellet feed*.

Os dois primeiros produtos supracitados (*lump ore* e *sinter feed*) passam pelas operações unitárias de britagem e classificação por tamanhos para a regularização de suas qualidades físicas e seguem para o pátio de produtos, já que a qualidade química é naturalmente satisfatória para a metalização.

Já para a produção de *pellet feed*, em que a faixa de tamanhos é, naturalmente, composta de um teor de contaminante maior do que as faixas que contém partículas maiores, há necessidade de inclusão de operações unitárias adicionais como deslamagem, condicionamento de reagentes e de concentração mineral para a regularização química.

Após estas operações, o produto mineral deverá apresentar condições químicas para abastecimento do processo de pelotização. A pelotização é o processo pré-metalúrgico que tem o objetivo de regularizar os tamanhos das partículas em um aglomerado, o qual atribui característica dimensional necessária para a metalização das partículas de minério de ferro abaixo de 0,15 mm.

Portanto, a produção do produto mineral *pellet feed* (Figura 6 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), o qual foi alvo deste estudo, utiliza diversos processos industriais que realizarão as operações unitárias responsáveis para: classificar por tamanho as partículas de minério; retirar partículas ultrafinas do processo – tamanhos menores que 10 mm; realizar o condicionamento de reagentes químicos nas partículas minerais; realizar a etapa de concentração separando os minerais rejeitados (quartzo, essencialmente) dos minerais de ferro (hematita, goethita).



Figura 6: Aparência do produto Pellet Feed. Fonte: arquivo do autor – referência de tamanho na seção Apêndice.

Após a etapa de concentração, o produto, em forma de polpa, com um nível de sílica de até 3,2%, segue para a etapa pré-metalúrgica de pelotamento. Após os finos concentrados de minério de ferro passarem pelo processo de pelotização, eles ganham a aparência de esferas (Figura 7). Em geral, as pelotas têm um valor de margem financeira maior que os produtos *Lump ore* e *sinter feed*. A faixa de tamanho das pelotas tem uma média de 12,5 mm.



Figura 7: Pelotas produzidas após o processo pré-metalúrgico. Fonte – [www.vale.com](http://www.vale.com), acesso feito em 10 out 2018 – referência de tamanho na seção Apêndice.

Embora as pelotas tenham no mercado uma margem financeira melhor do que a de produtos vendidos somente como concentrados minerais, o processamento mineral não consegue acertar em todas às vezes produto (*pellet feed*) com sílica abaixo de 3,2% e produtos com um nível de sílica maior que este valor são rejeitados pelo processo de pelotamento.

Na Figura 8 pode-se observar duas amostras do produto *pellet feed*, com níveis de contaminante sílica diferentes. Uma das amostras, foto a esquerda, tem um teor de sílica de 7%, sendo possível até mesmo verificar mais pontos brancos na amostra, em comparação com a foto apresentada à direita, o que é característico da sílica, que tem uma cor esbranquiçada, ou leitosa. Na foto à direita, a amostra possui um nível de sílica de 2%, na qual se verifica, nitidamente, que o aspecto apresenta uma quantidade menor de pontos brancos.



Figura 8: Produto *pellet feed* com níveis de contaminante diferentes, sendo a da esquerda com um teor de 7% de contaminante, à esquerda o mesmo produto, contudo com um teor de sílica de 2%. Os pontos brancos na massa mineral podem ser considerados como representantes de partículas de sílica – referência de tamanho na seção Apêndice.

A produção falha (valores de contaminante no produto acima de 3,2%) é desviada para a etapa de filtragem da água e é vendida como produto a granel com um valor de margem financeira estimada em 50% menor que o valor do produto que segue para o processo de pelotamento.

Assim, evitar falhas na produção deste processo industrial tem impacto direto na receita da indústria mineral estudada. No levantamento feito para este trabalho, o nível de acerto (produção dentro das especificações) foi verificado em 74%, ou seja, do total produzido, 74% da massa foi direcionada para produção de pelotas, ocasionando, aproximadamente, o dobro da receita se comparada com o restante de 26% da produção, que foi direcionada a venda como produto a granel<sup>2</sup>.

Na usina objeto deste estudo, a ordem de produção é de mais de 7 milhões de toneladas anuais de produtos minerais, as quais são direcionadas ao mercado internacional.

O problema relacionado nesta pesquisa é a produção do produto *pellet feed*, o qual tem constante desvios de qualidade química, sendo que altos níveis

<sup>2</sup> Neste estudo foram assumidos valores aproximados de produção e dos direcionamentos aos produtos. Foram omitidas as condições operacionais de blendagens, ou misturas, que, embora constituam manobras operacionalmente difíceis, permitem aos técnicos melhorar a oferta de produtos dentro de médias de especificação.



de contaminante inviabilizam o abastecimento do principal cliente, ou seja, a pelotização.

Com base no exposto buscar-se-á neste trabalho verificar quais poderiam ser os fatores que mais contribuiriam com a falha de produção do produto *pellet feed* e que levaram a se produzir concentrados de minério de ferro com teores de sílica acima de 3,2%.

### 3 – JUSTIFICATIVA

Uma usina de beneficiamento mineral, dotada de uma grande quantidade de dados provenientes de sensores e atuadores distribuídos pelos inúmeros equipamentos e sistemas, pode oferecer informações preciosas para o corpo técnico operacional.

Entretanto, a busca por padrões que levem a tomadas de decisões pelo corpo técnico de uma usina para a solução de problemas e anomalias pode ficar comprometidas devido a definição de especificações de tempo de consulta do histórico, ao grande volume de dados, à qualidade destes dados e à forma com a qual o banco de dados é avaliado. Muitas vezes, a aplicação de medidas descritivas dos dados pode consumir tempo de análise sem responder a diversos quesitos do processo.

Assim, a aplicação de ferramentas estatísticas, que não somente a sumarização em medidas de tendência central, podem auxiliar na tomada de decisão para atuação em processos e sistemas com melhor assertividade conduzindo a soluções de problemas mais rápidas e a um baixo custo.

Adicionalmente, a melhoria de processos industriais e, especialmente, processos minerais que conduzam a excelência em transformação de rochas em *commodities*, tende a beneficiar toda a cadeia ligada à indústria mineral.

### 4 – OBJETIVO

O intuito deste trabalho é identificar possíveis causas que originam falhas no processo de concentração de minério de ferro, por meio do processo de flotação, ocasionando a presença de contaminante (sílica) no *pellet feed*. A

partir da identificação das hipóteses, serão propostas ações e recomendações de melhoria no processo.

## 5 – REVISÃO DA LITERATURA

Todos os minérios são constituídos, fisicamente, de partículas<sup>3</sup> minerais e estes minérios são formados em ambientes geológicos característicos, o que pode atribuir qualidades químicas e físicas distintas. As características do minério que alimenta a usina de beneficiamento e os processos pelos quais o material é submetido são determinantes no rendimento operacional e na qualidade do produto final. Para garantir o controle dos parâmetros de qualidade, vários indicadores de desempenho são utilizados.

Os principais indicadores de desempenho de uma usina de beneficiamento mineral têm como principal objetivo a verificação do bom aproveitamento de massa de minério que vem da mina como produto. Alguns indicadores que podem ser elencados são:

- qualidade física e química dos produtos;
- consumo de insumos;
- custos de produção;
- indicadores de saúde ocupacional e segurança do trabalho.

Estes indicadores têm rotina de controle diversas, podendo ser acompanhados desde o menor período de tempo possível, por exemplo de minuto a minuto, ou mesmo de acompanhamentos mensais, como é o caso dos indicadores de consumo de insumos, como os reagentes químicos consumidos neste tipo de indústria.

Em relação ao aproveitamento da massa de minério como produtos, tem-se como indicador a razão chamada de recuperação em massa. Este indicador é uma simples razão entre a massa convertida em produto mineral pela massa de minério vindo da mina utilizada para a produção. Entende-se por massa de produto àquela referente ao produto dentro das expectativas de qualidade química e física dos clientes (numerador deste indicador). O denominador deste indicador é a massa de minério vinda da mina. Esta razão

---

<sup>3</sup> Não são considerados neste trabalho como minério a água mineral, petróleo e outros bens minerais que, ocasionalmente, possam ser encontrados em estado líquido, ou gasoso.

tem como universo de possibilidades o conjunto entre acima de zero e menor que um, em índice.

$$\text{Recuperação em massa} = \frac{\text{Massa de produto}}{\text{Massa de minério alimentado}}$$

Existem ainda outros indicadores para a qualidade química e física do minério que é alimentado nas usinas, bem como dos produtos. Estes indicadores são medidos em percentuais, por exemplo, quantidade de sílica do minério alimentado no processo de concentração mineral.

A determinação dos componentes químicos nas amostras de minério é determinada em laboratórios, os quais determinam as características químicas e físicas a partir das amostras retiradas de fluxos de massa do processo e dos produtos das usinas.

A rotina de amostragem para a determinação química e física segue um ciclo horário para amostras classificadas como críticas para a determinação de desempenho para a operação. Um exemplo é a determinação da qualidade química do *pellet feed*. As amostras com uma criticidade menor podem ser realizadas em um ciclo diário.

Já a rotina de amostragem das variáveis de processo, que são variáveis que auxiliam a medição do desempenho e permitem a operação dos equipamentos a distância, é realizada instantaneamente e continuamente, uma vez que são determinadas eletronicamente através de sensores e atuadores.

O padrão industrial para a separação de contaminantes do minério de ferro, e, conseqüentemente, a sua concentração no beneficiamento mineral pode ser a técnica de flotação. Outros processos para a separação/concentração de espécies de minerais considerados contaminantes ou minerais deletérios do minério de ferro são, por exemplo, a separação magnética, ou o peneiramento de alta frequência.

Segundo Santos, E. P. (2010), a flotação é um processo físico-químico de separação seletiva de partículas (ou agregados) de uma suspensão pela adesão a bolhas de ar, baseando-se na diferença da capacidade de partículas aderirem a uma interface.



Assim, o processo de flotação explora as propriedades físico-químicas de superfície dos minerais fazendo com que os mesmos tenham maior afinidade pela água ou ar, por meio da utilização de reagentes como a amina, amido e hidróxido de sódio. Este processo físico-químico torna as partículas de minerais de ferro hidrofílicas.

Quando o minério de ferro em polpa entra nos equipamentos de flotação, já condicionados com reagentes, as partículas de minerais de ferro tornam-se ávidos pela água e são sedimentadas até o fundo dos equipamentos e dali retiradas através de bombeamento.

Ao mesmo tempo em que as partículas de minério de ferro são sedimentadas, a contaminante sílica, na forma do mineral quartzo tornou-se ávido pelo ar. Esta característica é conhecida como hidrofobização.

Neste momento, dentro do equipamento de flotação, são produzidas bolhas de ar, cuja função é selecionar partículas hidrofóbicas como as partículas de quartzo. O processo segue com as partículas de quartzo sendo aprisionadas pelas bolhas de ar e levadas para a parte mais alta do equipamento, por onde saem por transbordamento. Assim, neste processo, os minerais são destinados para fluxos diferentes, sendo possível separá-los. Após a sedimentação até a parte mais inferior do equipamento de flotação os minerais de ferro poderão ser considerados produtos se já atenderem ao padrão de qualidade química especificado.

O processo de flotação é uma forma consagrada para a concentração de minério de ferro, porém problemas relacionados a propriedades físicas e químicas (mineralógicas) podem contribuir para uma redução da eficiência deste processo. De acordo com Li *et. al.*(1993) e Feng e Aldrcih (1999), o tamanho das partículas minerais envolvidas no processo de flotação interfere nos resultados de recuperação, podendo afetar a taxa de flotação, como demonstrado por Ahmed e Jameson (1985) e Hernániz e Calero (2001). Filippov et al (2010) correlacionou que a presença de complexos minerais “Fe-Al Anfibólios”, a qual é uma característica de origem mineral, pode ser um problema para a separação de sílica (quartzo) durante concentração do minério de ferro através da flotação.

## 6 – METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia proposta para este trabalho consiste no estudo de uma usina que fomenta o processo pré-metalúrgico de pelotamento através da flotação.

O estudo de caso considera as informações constantes em um banco de dados de uma indústria de beneficiamento mineral, com rotina de operação de 24 horas por dia, em 365 dias no ano. Este banco de dados é composto por 53 variáveis ligadas ao processo de concentração mineral, em que os dados de cada variável foram gerados hora a hora em um horizonte de tempo de 6 meses. As variáveis foram categorizadas em duas classificações: variáveis de processo e variáveis de qualidades químicas e físicas.

A Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam, respectivamente, possíveis variáveis típicas que podem ser utilizadas para análise do processo industrial para uma usina de concentração de minério de ferro e as variáveis químicas do processo de beneficiamento mineral.

Tabela 2: Variáveis de processo de beneficiamento mineral, usina de concentração de minério de ferro.

Possíveis variáveis de processo para análise do processo industrial de beneficiamento mineral				
Variáveis industriais	Vazão de Água	m <sup>3</sup> /h	Nível de coluna de flotação 4	mm
	Alimentação de minério	t/h	Nível de coluna de flotação 5	mm
	Produto granulado 1	t/h	Nível de coluna de flotação 6	mm
	Produto granulado 2	t/h	Nível de coluna de flotação 7	mm
	Densidade de polpa 1	t/m <sup>3</sup>	Vazão de Ar coluna de flotação 1	Nm <sup>3</sup> /h
	Linha de polpa para os ciclones 1	m <sup>3</sup> /h	Vazão de Ar coluna de flotação 2	Nm <sup>3</sup> /h
	Linha de polpa para os ciclones 2	m <sup>3</sup> /h	Vazão de Ar coluna de flotação 3	Nm <sup>3</sup> /h
	Densidade de alimentação de ciclones	t/m <sup>3</sup>	Vazão de Ar coluna de flotação 4	Nm <sup>3</sup> /h
	Correção de densidade	m <sup>3</sup> /h	Vazão de Ar coluna de flotação 5	Nm <sup>3</sup> /h
	pH para dispersão de ultrafinos	pH	Vazão de Ar coluna de flotação 6	Nm <sup>3</sup> /h
	pH na alimentação do processo de flotação	pH	Vazão de Ar coluna de flotação 7	Nm <sup>3</sup> /h
	Pressão de ciclones 1	kgf/cm <sup>2</sup>	Vazão espessador linha A	m <sup>3</sup> /h
	Pressão de ciclones 2	kgf/cm <sup>2</sup>	Densidade espessador linha A	t/m <sup>3</sup>
	Pressão de ciclones 3	kgf/cm <sup>2</sup>	Vazão de alimentação usina flotação A	m <sup>3</sup> /h
	Pressão de ciclones 4	kgf/cm <sup>2</sup>	Densidade de alimentação da flotação A	t/m <sup>3</sup>
	Pressão de ciclones 5	kgf/cm <sup>2</sup>	Densidade de espessador linha D	t/m <sup>3</sup>
	Pressão de ciclones 6	kgf/cm <sup>2</sup>	Vazão espessador linha D	m <sup>3</sup> /h
	Pressão de ciclones 7	kgf/cm <sup>2</sup>	Percentual de sólidos espessador linha D	%
	Pressão de ciclones 8	kgf/cm <sup>2</sup>	Massa saída espessador linha D	t/h
	Reagente 1 linha 1	l/h	Massa de pellet feed	t/h
	Reagente 1 linha 2	l/h	Alimentação total da flotação	t/h
	Reagente 1 linha 3	l/h	Massa de minério tanque 1	t/h
	Reagente 2 (volume adiconado)	l/h	Recuperação das baterias de cic	%
	Valor de dosagem reagente 2	g/t	Vazão tanque 01	m <sup>3</sup> /h
	Nível de coluna de flotação 1	mm	Recuperação da ciclonagem corre	%
	Nível de coluna de flotação 2	mm	Nível da tanque-cx 01	%
Nível de coluna de flotação 3	mm			

Tabela 3: Variáveis químicas de beneficiamento mineral, usina de concentração de minério de ferro.

Variáveis para análise químicas do processo industrial		
Qualidade química	Fe alimentação	%
	SiO <sub>2</sub> alimentação	%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alimentação	%
	P alimentação	%
	Mn alimentação	%
	FE Flotação	%
	SiO <sub>2</sub> Flotação	%
	Alumina Flotação	%
	Mn Flotação	%
	P Flotação	%
	Sílica no produto	%

Dentre as variáveis apresentadas nas tabelas acima, duas são consideradas respostas importantes da indústria mineral. Estas variáveis são a massa recuperada como produto e o percentual de contaminante no produto, que é a sílica no produto *pellet feed*.

Os estudos e trabalhos aqui realizados foram organizados de forma a se entender os fenômenos ligados com os desvios de qualidade do *pellet feed*, mapeando suas principais causas. A Figura 9 apresenta as etapas realizadas para esta pesquisa.

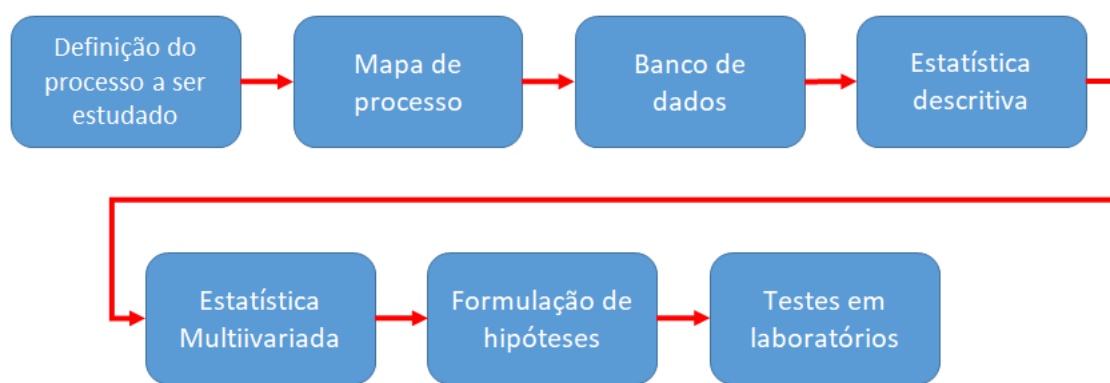


Figura 9: Sequência de estudos, formulação de hipóteses e comprovação das causas ligadas aos desvios de qualidade do produto *pellet feed*.

Assim, para análise deste banco de dados, será utilizada a técnica de estatística multivariável, conhecida como *k-médias*, para verificar padrões associados aos desvios de qualidade do concentrado de minério de ferro, isto é, desvios de qualidade química do *pellet feed*. A estes padrões serão verificados se existiria uma forma de atribuir robustez ao processo para conter desvios de qualidade do produto.

Para a determinação de qualidades químicas do minério é realizada a amostragem regular de fluxos da usina, as quais são enviadas ao laboratório operacional. Neste laboratório as amostras são preparadas para adequação da quantidade de massa e pulverização para que estas possam ser inseridas em um equipamento de fluorescência de raios x para a determinação química da amostra. O equipamento que realiza esta técnica incide sobre a amostra raios x, as ondas propagadas são então lidas, e conforme o padrão apresentado são

definidas as quantidades de cada elemento, ou espécie química contida na amostra.

### 6.1 Mapa de processo

Para iniciar o trabalho e facilitar a análise dos fenômenos, foi desenvolvido um mapa de processo para elencar todas as variáveis industriais. Este mapeamento elegeu as variáveis de entrada e saída de cada operação unitária.

A resposta apresentada no mapa de processo é relativa à qualidade química do produto *pellet feed*, especificamente, o teor de sílica no concentrado. Vale lembrar que a especificação de limite superior para este produto é acertada em 3,2%. Conforme já mencionado, existe o acordo de recusa de recebimento de massa mineral pela usina de pelotização em caso de falhas, sendo considerado falha a oferta de produto mineral com teor médio de sílica no concentrado acima deste valor.

Com isso, a usina produtora desta matéria prima arca com prejuízos que vão desde a realização de outros processos para o desvio da produção como também de venda deste produto com um valor mais baixo.

Para a confecção do banco de dados, foi necessária a criação e estudo das variáveis ligadas ao processamento mineral através de um mapa de processo. Este é uma ferramenta gráfica que auxilia os analistas a entenderem a relação entre as variáveis explicativas de um processo e respectivas respostas.

Na Figura 10, apresenta-se o mapa de processo criado para análise da produção da usina base deste trabalho. Nele pode-se verificar como saídas os fluxos que representam os produtos. Todas as características resultantes nos produtos podem ser consideradas como uma resposta do processo à produção dele. As características pertinentes aos outros fluxos são consideradas como variáveis explicativas. A Figura 11 ilustra o fluxograma do processo de beneficiamento mineral.

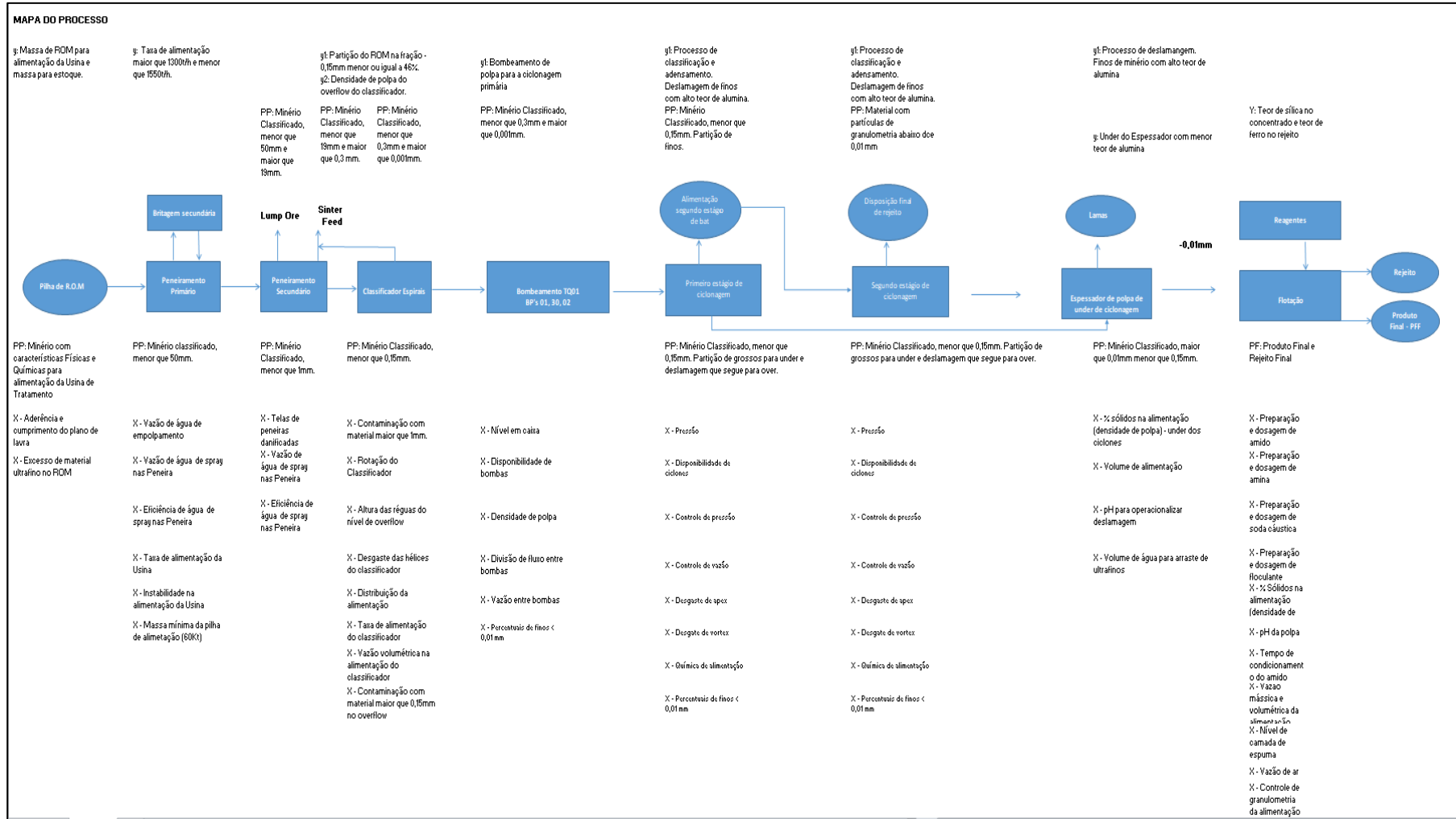


Figura 10: Mapa de processo.

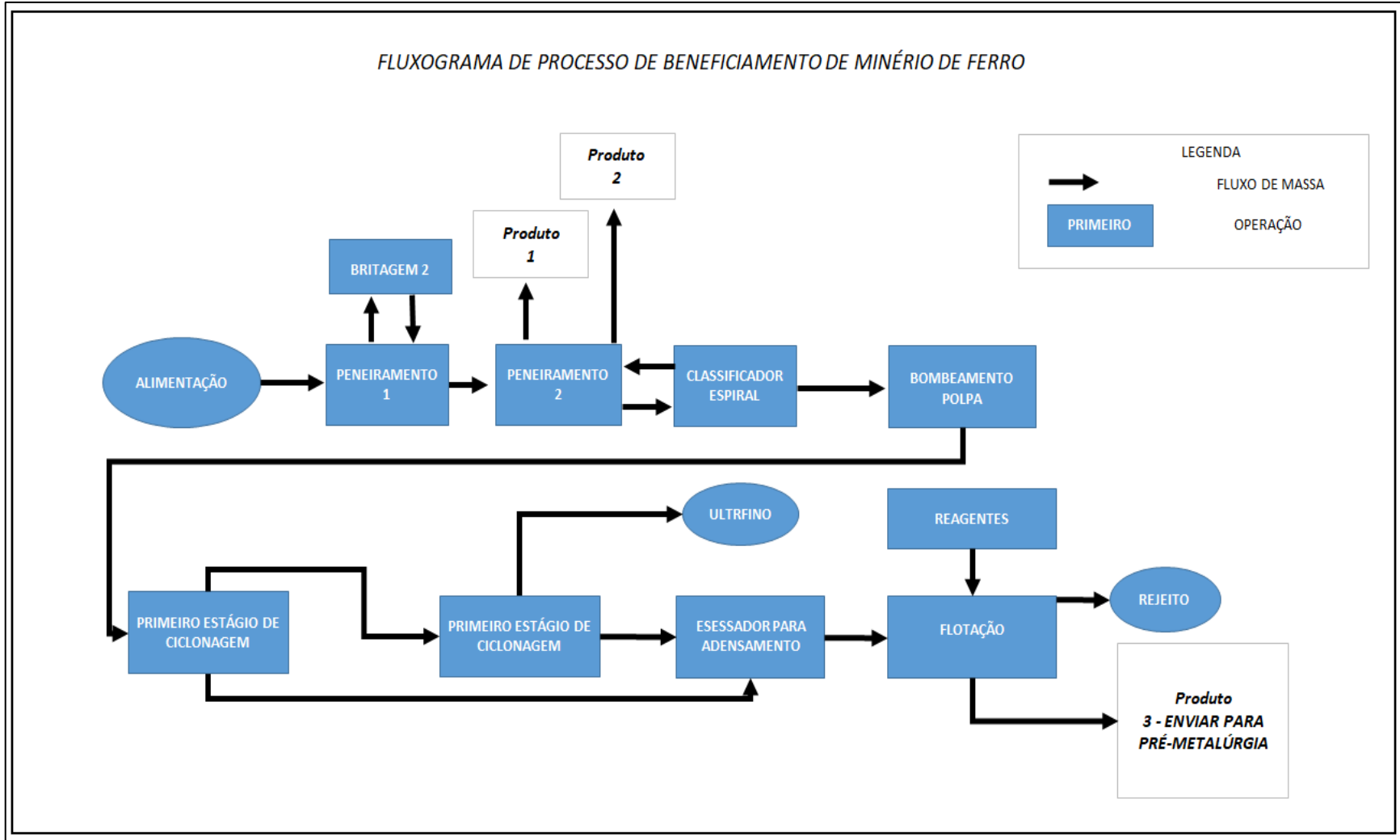


Figura 11: Fluxograma de processo

## 6.2 Banco de dados

Após definidas as variáveis explicativas e a resposta com ajuda do mapa de processo, foi organizado o banco de dados. Nele cada variável, ou vetor, foi arranjado de forma com que os dados ficassem dispostos em colunas e cada linha correspondesse ao período mínimo de uma hora, sendo que os valores médios de cada variável foram medidos simultaneamente, segundo a data correspondente da linha. O horizonte de tempo estudado foi de 6 meses, período compreendido entre janeiro e junho de 2018.

Exemplo de arquitetura adotada para o bando de dados			
Data e hora	Variável 1	Variável 2	Variável 3
01/01/2018 01:00	1231	2345	3456
01/01/2018 02:00	1231	2345	3456
01/01/2018 03:00	1231	2345	3456
01/01/2018 04:00	1231	2345	3456
01/01/2018 05:00	1231	2345	3456
01/01/2018 06:00	1231	2345	3456
01/01/2018 07:00	1231	2345	3456
01/01/2018 08:00	1231	2345	3456
(...)			

Figura 12: Exemplo de arquitetura de banco de dados adotado neste trabalho. Os valores apresentados são valores de exemplo.

Este banco de dados possui um total de 65 variáveis, 53 variáveis industriais e 11 variáveis de qualidade química e uma ligada a resposta. Cada variável e a resposta foram medidas pelo valor médio hora a hora, resultando em mais de 400 mil dados.

A consulta destes valores só foi possível graças a um sistema industrial de *historiação*<sup>4</sup> de dados, com capacidade de armazenamento de até dois anos de dados de todas as variáveis da usina.

O tratamento do banco de dados foi necessário, pois existem valores inconsistentes com a operação usina, como por exemplo, as paradas para as manutenções preventivas e corretivas, quando os equipamentos ficam

<sup>4</sup> *Historiação* pode ser um termo para designar que os valores lidos nos sensores e atuadores serão armazenados em um sistema computadorizado, sendo possível o acesso aos dados armazenados pelos técnicos e analistas a qualquer momento – o horizonte de tempo armazenado é de até dois anos, sendo o primeiro dado armazenado suprimido para armazenamento de dado mais recente.



inoperantes. Devido a estes eventos, os sensores podem registrar valores zero ao longo do tempo, inserindo no banco de dados vícios de amostragem. Nestes casos, todos os períodos de verificação destes eventos foram eliminados do banco de dados.

Após o tratamento do banco de dados, foi realizada a análise estatística descritiva para avaliar as distribuições dos dados de cada variável. Com esta abordagem, pôde-se identificar medidas de tendência central.

### 6.3 Estatística multivariada

O banco de dados formado a partir do mapa de processo é bastante extenso e, resumindo-o utilizando-se uma estatística descritiva, seria difícil encontrar relações e interações entre as variáveis e as respostas que melhor explicassem as anomalias de processo e, conseqüentemente, o porquê das falhas de produção.

A interpretação de anomalias de uma grande quantidade de dados é parte da rotina operacional da indústria mineral e demanda agilidade para evitar perdas dentro de um cenário de constante mudança de operação, envolvendo o processamento de milhares de toneladas minério a cada hora.

Segundo Corrar et al. (2007 p. 02), citado por Silva (2017 p. 17), a análise multivariada é um conglomerado de métodos estatísticos que viabilizam a análise conjunta de várias variáveis de forma simultânea.

Dessa maneira, devido à complexidade dos dados e as múltiplas relações com as respostas buscou-se utilizar métodos que resumissem os dados à luz da classificação das variáveis em grupos, utilizando-se o que é conhecido como agrupamento de dados.

Para esta etapa do estudo, utilizou-se um algoritmo de análise multivariada conhecida como k-médias. Basicamente, cada elemento amostral é alocado àquele *cluster* cujo centroide (vetor de médias amostral) é o mais próximo do vetor de valores observados para o respectivo elemento (Mingoti, 2017). Assim, o algoritmo verifica cada dado e o aloca em uma posição em que ele tenha a menor distância euclidiana possível. Este tipo de técnica é aplicada a todos os dados até que o último seja alocado em um grupo, dos k grupos anteriormente determinados pelo analista.

A seguir, são detalhados os passos do algoritmo:

1. Escolha dos  $k$  centróides, também chamados de sementes;
2. Cada elemento do banco de dados é comparado com cada centróide. As alocações dos elementos serão feitas com base na menor distância (euclidiana), a um determinado centróide;
3. Depois se recalcula cada centróide e repete-se o passo anterior;
4. Repetem-se os passos 2 e 3, até que nenhuma relocação seja feita.

Este método é bastante intuitivo, pois fornece vetores baseados em dados com dimensões das mesmas variáveis do banco de dados e não em índices que demandam interpretação do analista. Isso facilita a compreensão do fenômeno inclusive de outros técnicos.

#### 6.4 Testes laboratoriais

Com base nos resultados das análises estatísticas descritiva e multivariada descritas acima, será possível formular as possíveis causas e padrões que afetam o resultado químico do produto. Estas causas levantadas serão comprovadas em testes de laboratório (flotação em bancada) que simulam a flotação industrial em amostras de minério.

Com estes testes é possível definir a melhor performance de flotação, os melhores reagentes e o pH ótimo da polpa.

As etapas para a realização dos testes de flotação em bancada passam pela definição das características da amostra em termos de granulometria, química e umidade. Na sequência, é feita a preparação da amostra, etapa em que o técnico realiza a divisão de toda a massa recebida em forma de amostra em diversas alíquotas de massa. Cada alíquota será dedicada a um teste.

Após a etapa anterior, define-se os parâmetros dos testes, como, por exemplo, qual o pH em que será realizada a flotação, qual a dosagem de reagente coletor - amina, densidade de polpa mineral, para que estes sejam controlados durante a realização do teste.

Os testes são realizados em equipamento de flotação similar ao industrial, em escala de laboratório. A Figura 13 mostra um exemplo de um equipamento deste tipo e a Figura 14, um exemplo de um processo de flotação

industrial. Verifica-se que, na parte superior do equipamento, tem-se o fluxo de rejeito. As partículas que são sedimentadas neste equipamento são as partículas de minério de ferro concentradas.



Figura 13: Equipamento de flotação em bancada. Fonte: arquivo do autor.



Figura 14: Equipamento de flotação industrial. Na foto à esquerda podemos ver um equipamento de flotação industrial e o fluxo de rejeito contendo as partículas de sílica, a foto à direita mostra um detalhe da espuma que sai do mesmo equipamento contendo as partículas de sílica. Fonte: arquivo do autor.

Nos equipamentos de flotação em bancada, é possível efetuar controles totalmente manuais, como, por exemplo, alimentação de minério no interior do equipamento, adição de água para formação de polpa, adição de reagentes, medição de variáveis como o pH, etc.

Antes do teste, deve-se realizar o condicionamento das partículas minerais com os reagentes. Para esta atividade realiza-se a dosagem de uma determinada quantidade de reagente na polpa, e promove-se a agitação mecânica por um determinado tempo para que se tenha a garantia do contato efetivo dos reagentes com as partículas. Na Figura 15, mostra-se o fluxo das atividades para o teste em bancada.

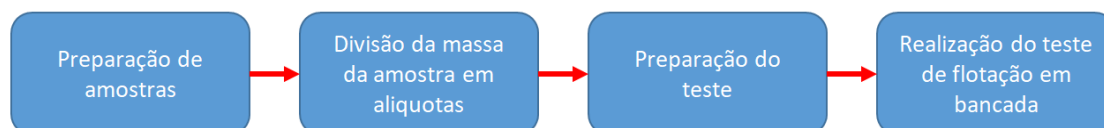


Figura 15: Fluxo de testes de flotação em bancada.

Para a flotação de minério de ferro, que é do tipo catiônica reversa, são utilizados três reagentes, a saber:

- Amido, o qual também é conhecido como reagente depressor, com o objetivo de evitar com que as partículas de hematita sejam enviadas, erroneamente, para o fluxo de rejeito, permitindo que estas possam seguir para a parte inferior do equipamento;
- Amina, reagente utilizado para tornar as partículas de sílica hidrofóbicas, ou apolares. Este reagente altera a característica de superfície da sílica, permitindo que as bolhas de ar no interior do equipamento as aprisionem e as arrastem para o fluxo de transbordamento do equipamento;
- Hidróxido de sódio, com a função de modular o pH da polpa de minério, promovendo a otimização da adsorção e a ligação química dos reagentes na superfície dos minerais.

## 7 – ANÁLISES DESCRITIVAS DOS DADOS

A análise descritiva dos dados teve como objetivo criticar a estabilidade do processo. Nesta etapa, foram estudados os limites de processo e confeccionadas cartas de controle com estes limites para todas as variáveis do banco de dados.

Na Figura 16, apresenta-se a distribuição da variável SiO<sub>2</sub><sup>5</sup> no concentrado, que é o contaminante do produto, ou seja, a sílica. Pode-se verificar que esta variável é truncada, já que é um resultado de um processo cujo objetivo é reduzir o total deste contaminante.

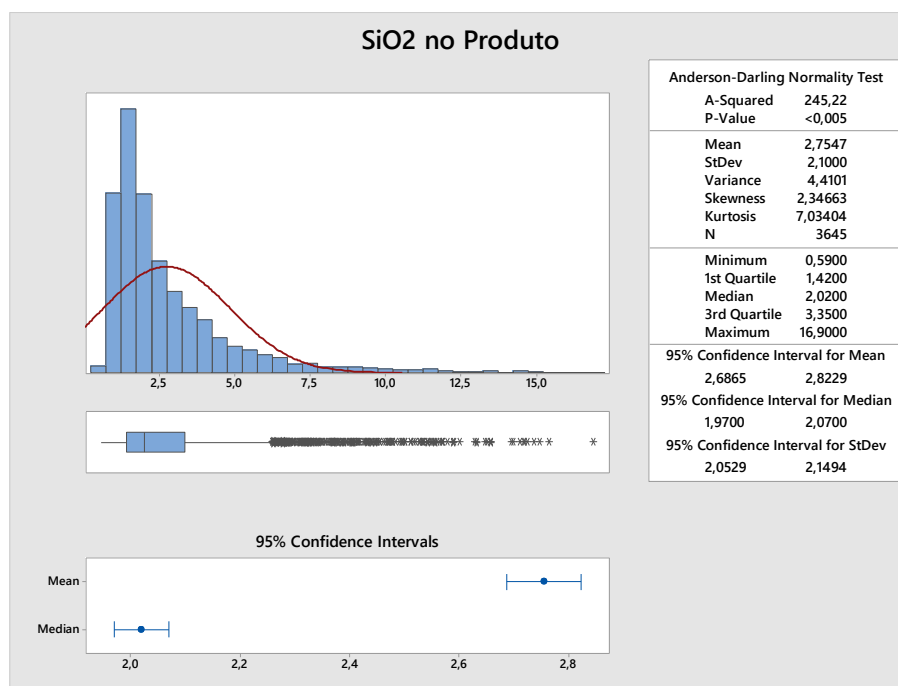


Figura 16: Resumo estatístico para a distribuição de dados para a contaminante sílica no produto. Os dados tratados são referentes a resultados industriais do processo.

Apesar dos esforços da atividade industrial, pode-se verificar na Figura 16 que, em diversos momentos, existem ocorrências de contaminante acima do teor de 3,2%.

<sup>5</sup> Variável do banco de dados que representa os teores de sílica no produto *pellet feed*.

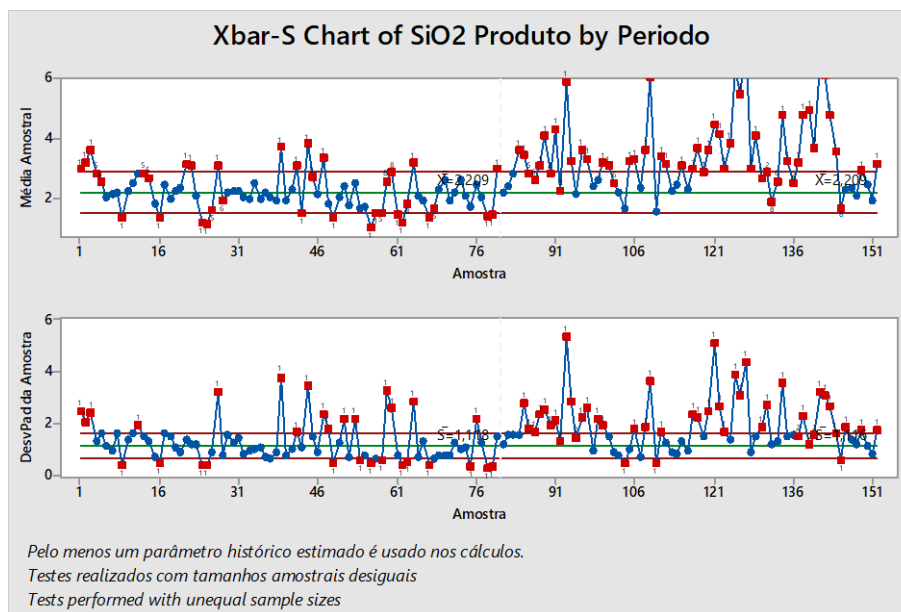


Figura 17: Carta de controle para dados históricos de sílica no produto. Dados industriais. Os limites de controle representados no gráfico o valor para LS é de 3,2% e LI de 1,5% de sílica no produto.

Analisando-se o gráfico da Figura 17, que apresenta a variação temporal da variável sílica no produto, nota-se um evento disruptivo de nível do contaminante, um degrau ao longo da série.

Este evento elevou o nível de contaminante no produto. As análises das cartas de controle podem gerar a hipótese de que o aumento pode estar ligado a variações dos tipos litológicos, por exemplo, os quais podem ter tido uma alteração do padrão de composição química.

7.1 Análise de variáveis ligadas às demais espécies químicas que compõem o minério de ferro que alimentam o processo de flotação.

Além do contaminante sílica, o minério de ferro possui também outros contaminantes em que os valores de teores são menores se comparados aos teores encontrados para a sílica. Estes contaminantes são a alumina ( $Al_2O_3$ ), óxido de magnésio (MgO), fósforo (P) e manganês (Mn).

Conforme já informado, alterações do padrão químico do minério que alimenta o processo de flotação pode afetar o resultado deste processo, sendo possível formular a hipótese de que alterações destes contaminantes poderiam desestabilizar o processo de flotação, permitindo que a sílica não fosse separada dos minerais de ferro.

Os três próximos gráficos (Figura 18, Figura 19 e Figura 20), referentes aos contaminantes Mn,  $Al_2O_3$  e MgO, apresentam, no mesmo horizonte de tempo, que para a análise da contaminante sílica no produto, um significativo aumento de valores até o final do período analisado.

Isso levanta a hipótese de que existe uma influência significativa destes contaminantes para o aumento da sílica no produto. A seguir apresenta-se a análise através de k-médias para as variáveis ligadas ao processo de flotação.

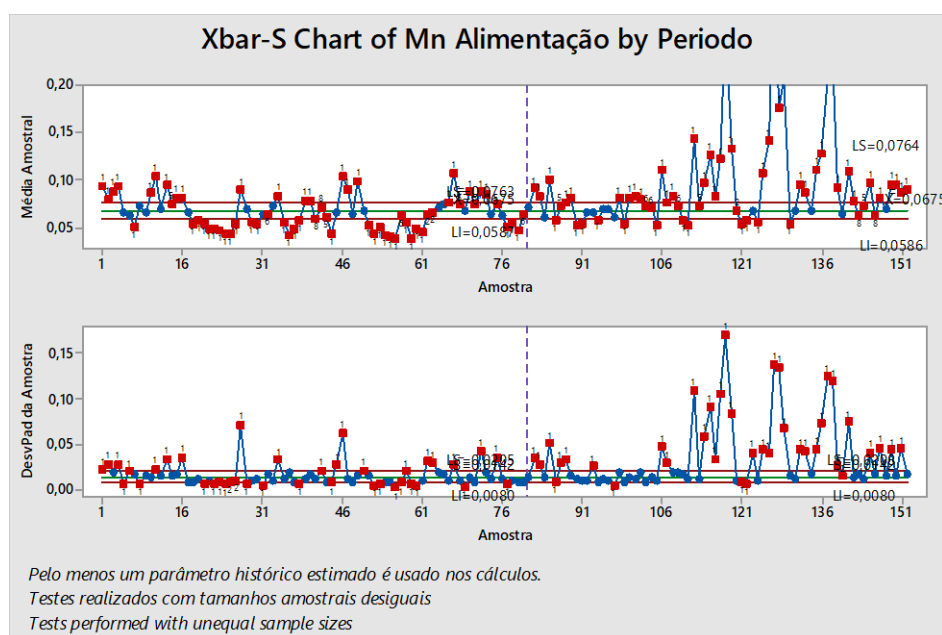


Figura 18: Carta de controle para dados históricos de manganês no produto. Dados industriais.

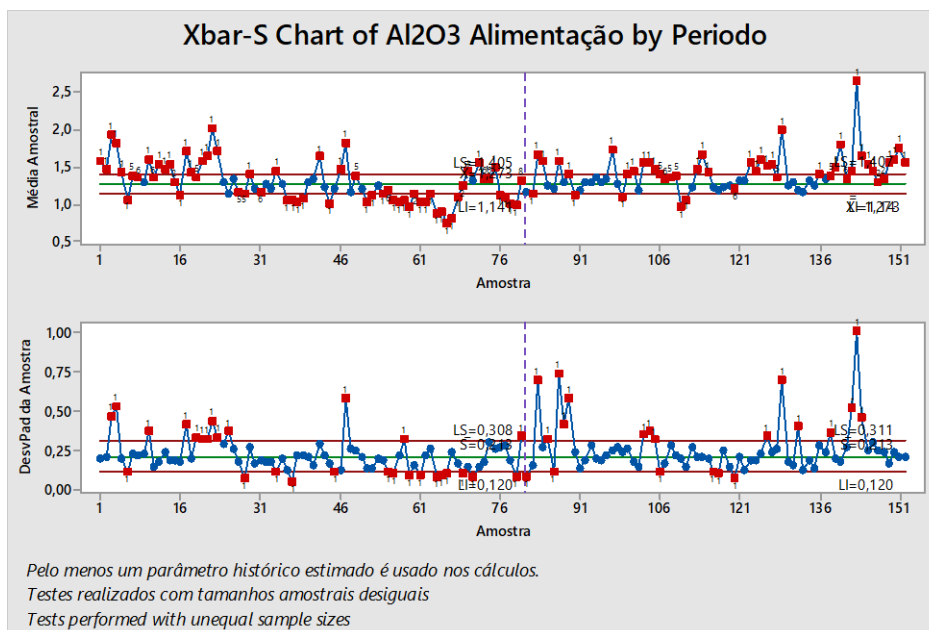


Figura 19: Carta de controle para dados históricos de alumina no produto. Dados industriais.

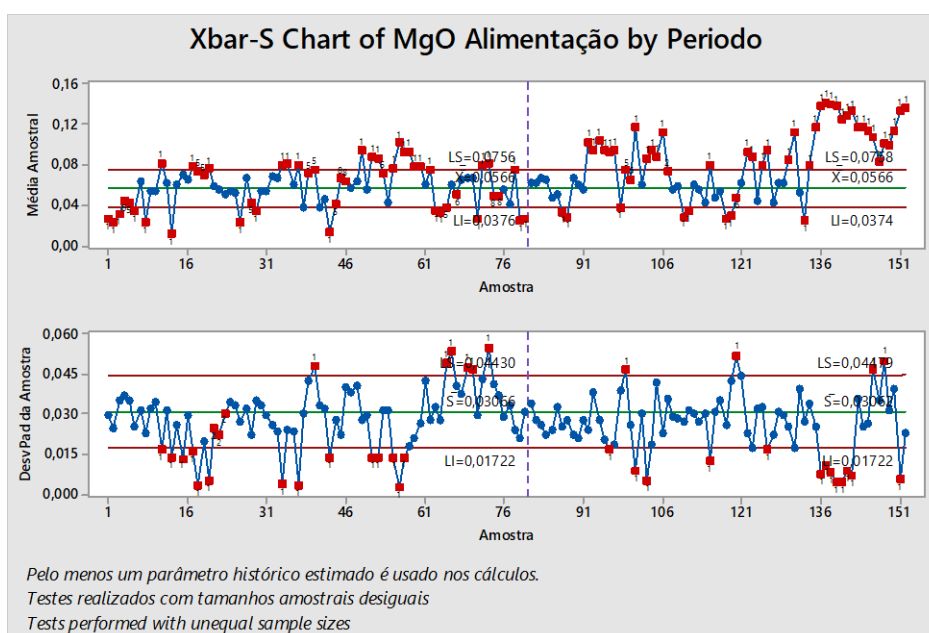


Figura 20: Carta de controle para dados históricos de óxido de magnésio no produto. Dados industriais.



## 8 – APLICAÇÃO DO ALGORITMO K-MÉDIAS

O algoritmo de k-médias foi aplicado para a sumarização do banco de dados como uma forma de aglomerar em uma quantidade menor de vetores para a explicação do fenômeno das falhas de sílica no produto.

Para este algoritmo, foi definido como k o valor de oito vetores, ou oito aglomerados, pois seria o número que melhor explicaria a gama de litotipos que poderiam alimentar a usina de beneficiamento. Assim, a hipótese que se testou com esta ferramenta é a de que existe um ou um grupo de litotipos que influenciam no resultado de falhas na produção e, por consequência, a quantidade de contaminante no produto.

Os dados foram tratados no software Minitab e os resultados estão apresentados na Figura 21. A Figura 22 mostra a saída de dados, proveniente do software Minitab.

Análise de Agrupamentos de K-médias: Sinter Feed ; Vazão de Pol; Vazão de Água; pH CN02; HC01;				
Partição Final				
Número de agrupados: 8				
	Número de observações	Dentro da soma de quadrados do agrupado	Distância média do centróide	Distância máxima do centróide
Agrupado1	185	3,38804E+07	345,857	1676,595
Agrupado2	491	2,43290E+08	609,329	2408,200
Agrupado3	72	3,18247E+07	577,619	1607,612
Agrupado4	431	2,32114E+08	672,847	1719,165
Agrupado5	507	1,50361E+08	493,662	1767,419
Agrupado6	489	2,36720E+08	584,215	2368,877
Agrupado7	973	3,29324E+08	523,995	1719,164
Agrupado8	497	3,11745E+08	711,230	2271,311

Figura 21: Resultado do tratamento dos dados industriais no software Minitab. Esta saída do programa de computador apresenta a distância dos centróides para a classificação de grupos.

Variável	Agrupado1	Agrupado2	Agrupado3	Agrupado4	Agrupado5	Agrupado6	Agrupado7	Agrupado8	Centróide global
Sinter Feed Total	642,4390	678,2768	578,6744	552,1017	586,0999	590,6178	617,2541	452,0557	587,8547
Vazão de Polpa 320-TQ01	775,9470	731,4578	756,8564	692,8079	765,4938	665,5695	621,4121	605,3744	678,9750
Vazão de Água TQ01	29,7848	60,5081	62,3364	83,5173	57,8290	73,7548	73,6713	90,2766	70,6828
pH CN02	9,6226	9,7436	9,5800	9,6263	9,5979	9,7379	9,6077	9,4424	9,6220
HC01	2,3550	2,2568	2,2261	2,2953	2,4460	2,3969	2,3149	2,1380	2,3102
HC02	2,3407	2,2978	2,1443	2,2189	2,3747	2,4657	2,4122	2,1287	2,3283
HC04	2,5780	2,5108	2,5324	2,4861	2,6121	2,5772	2,5867	2,3210	2,5291
HC05	2,2687	2,1901	2,1354	2,1903	2,2095	2,1784	2,1074	2,0026	2,1465
Vazão Amido EP01	5630,7504	2735,4407	4366,0573	2673,4454	3425,9066	1682,4835	1576,4092	1330,8602	2361,1397
Amido TQ07	0,4560	2894,3080	27,3291	1588,0077	2068,7785	3632,7032	2575,9918	1099,8325	2190,9212
Nível CF5	464,0858	687,0766	509,8005	648,9829	486,2026	677,3042	795,1964	715,8367	671,2843
Nível CF6	508,9946	721,4905	530,6551	753,7459	541,8952	768,4300	755,7390	756,9381	706,0420
Nível CF7	467,8682	678,2450	482,5510	662,5178	492,1747	662,6549	737,7348	724,9331	656,1156
Dosagem de amina	47,6726	43,1248	49,0599	46,2252	46,9689	56,6258	54,7879	53,1602	50,6671
Fe Alimentação	53,8144	54,0926	54,7838	52,9696	53,4465	53,0535	53,9558	55,3950	53,8712
SiO2 Alimentação	18,6788	18,0380	17,0696	19,3903	18,6726	19,2503	17,8137	15,3568	18,0367
Al2O3 Alimentação	1,2438	1,1452	1,3140	1,3824	1,4191	1,3471	1,3559	1,4469	1,3442
P Alimentação	0,0522	0,0553	0,0556	0,0574	0,0571	0,0559	0,0558	0,0587	0,0563
Mn Alimentação	0,0666	0,0673	0,0648	0,0691	0,0674	0,1011	0,0805	0,0955	0,0794
CaO Alimentação	0,0110	0,0102	0,0103	0,0102	0,0102	0,0101	0,0101	0,0102	0,0102
MgO Alimentação	0,0609	0,0699	0,0609	0,0629	0,0578	0,0677	0,0678	0,0894	0,0686
TiO2 Alimentação	0,0948	0,0777	0,1045	0,1056	0,1111	0,1082	0,1133	0,1152	0,1058
+0,15mm Alimentação	15,7719	15,2185	13,6722	15,2794	16,3665	16,3178	15,7628	14,0082	15,5107
-0,045mm Alimentação	31,1503	31,1823	32,0542	30,8596	30,5036	30,8871	30,4305	31,5052	30,8691
SiO2 Produto	2,3699	2,0158	2,6007	2,3884	2,2947	2,9682	3,1790	3,3967	2,7547

Figura 22: Saída do software Minitab mostrando os oito vetores que resumiriam os dados do processo industrial de beneficiamento mineral.

Para melhor analisar os resultados da aplicação da técnica de k-médias, foi realizada uma formatação destes aglomerados. A nova estrutura foi feita pensando em ordenar os dados de maneira crescente, em função do contaminante no produto. Assim, buscava-se orientar a análise através de padrões que tivessem o mesmo comportamento da sílica no produto, ou seja, se este contaminante tem seus valores elevados ao longo da série e outros também o possuem então estas variáveis poderiam também serem influentes na variabilidade encontrada no produto.

Tabela 4: Resultado do tratamento dos dados através de k-médias.

K-médias para o agrupamento por tipos de minérios e ajustes de usina										
Variável significativas	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6	Tipo 7	Tipo 8	Gráficos de tendência	Fase Avaliada
SiO2 Produto	2,02	2,29	2,37	2,39	2,60	2,97	3,18	3,3967		Produto
Vazão de polpa	731,5	765,5	775,9	692,8	756,9	665,6	621,4	605,4		Ajustes de Usina
Vazão de água	60,5	57,8	29,8	83,5	62,3	73,8	73,7	90,3		
pH	9,7436	9,5979	9,6226	9,6263	9,58	9,7379	9,6077	9,4424		
Pressão ciclones 11	2,26	2,45	2,36	2,30	2,23	2,40	2,31	2,14		
Pressão ciclones 12	2,30	2,37	2,34	2,22	2,14	2,47	2,41	2,13		
Pressão ciclones 21	2,51	2,61	2,58	2,49	2,53	2,58	2,59	2,32		
Pressão ciclones 22	2,19	2,21	2,27	2,19	2,14	2,18	2,11	2,00		
Reagente Amido 1	2735	3426	5631	2673	4366	1682	1576	1331		
Reagente Amido 2	2894	2069	0	1588	27	3633	2576	1100		
Nível coluna 1	687	486	464	649	510	677	795	716		
Nível coluna 2	721,49	541,90	508,99	753,75	530,66	768,43	755,74	756,94		
Nível coluna 3	678,25	492,17	467,87	662,52	482,55	662,65	737,73	724,93		
Reagente amina	43,12	46,97	47,67	46,23	49,06	56,63	54,79	53,16		
Fluxo saída 1	678,3	586,1	642,4	552,1	578,7	590,6	617,3	452,1		Minério
Fe Alimentação	54,09	53,45	53,81	52,97	54,78	53,05	53,96	55,40		
SiO2 Alimentação	18,04	18,67	18,68	19,39	17,07	19,25	17,81	15,3568		
Al2O3 Alimentação	1,15	1,42	1,24	1,38	1,31	1,35	1,36	1,4469		
P Alimentação	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,0587		
Mn Alimentação	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,10	0,08	0,0955		
CaO Alimentação	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0102		
MgO Alimentação	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,0894		
TiO2 Alimentação	0,08	0,11	0,09	0,11	0,10	0,11	0,11	0,1152		
+0,15mm Alimentação	15,22	16,37	15,77	15,28	13,67	16,32	15,76	14,0082		
-0,045mm Alimentação	31,18	30,50	31,15	30,86	32,05	30,89	30,43	31,5052		

Na Tabela 4, podem ser verificados os resultados do tratamento dos dados através de k-médias, divididos em três partes, separadas por cores – laranja, verde e azul. Na região em verde, são apresentadas as variáveis de usina, e, na região azul, as variáveis de qualidade química do minério que alimenta a usina. A última região, em laranja, notadamente, a primeira linha de dados da tabela, apresenta os valores de sílica, contaminante, no produto.

Analisando-se os três últimos vetores estabelecidos pela técnica utilizada, nota-se que para estes o valor de sílica no produto está, praticamente, acima de 3% e as variáveis de usina encontram-se em seus limites máximos, ou mínimos de ajuste.

Em termos de controle é conhecido como saturação, termo que se refere à permanência do ajuste de uma variável por longos períodos nos extremos possíveis de ajuste. Isto é feito na tentativa de alteração da resposta do processo.

Isto conduz a hipótese de que, para os padrões de litotipos tipo 6, tipo 7 e tipo 8, que alimentam a usina, o padrão industrial está em seu limite de ajuste e não teria condição de retirar mais contaminante sílica do minério do que aqueles valores obtidos pelas médias encontradas nestes dos vetores.

Desta forma, para testar a última hipótese levantada, deu-se continuidade aos testes de laboratório, que teriam como base testes com amostras de minério que apresentassem os valores próximos dos três últimos vetores da Tabela 4, ou seja os tipos 6, 7 e 8. A realização dos testes em laboratório também foi feita com amostras que representassem os minérios com teores químicos próximos aos 5 primeiros tipos.

O que mais surpreendeu após a utilização desta ferramenta foi a condição de alimentação do minério no processo. A conclusão preliminar é que o resultado de sílica no produto não é uma função da quantidade de sílica na alimentação do processo, pelo menos não nos limites experimentados para o processo estudado, sendo que o mais significativo, em termos de teores químicos de alimentação são ligados aos contaminantes  $Al_2O_3$ , MgO e Mn.

## 9 – RESULTADOS DOS TESTES DE LABORATÓRIO

A análise resultante da aplicação da técnica de k-médias proporcionou a seleção de dois alvos para a busca de amostras que representassem as categorias de minérios: a categoria 1 seria ligada aos tipos de 1 a 5 e a categoria 2 seria a que representasse os tipos de 6 a 8. A Tabela 5 apresenta os alvos de amostragem, o alvo 1 é referente à categoria 1 e o alvo 2 à categoria 2.

Amostragens para os padrões de minério classificados na Tabela 4 foram planejadas e realizadas na própria usina de beneficiamento mineral. Por definição, as amostras são coletadas em fluxo de polpa que antecede o processo de flotação.

A coleta de amostras seguiu um padrão de tentativa e erro, processo necessário para acertar os alvos 1 e 2, já que é impossível determinar em qual instante passaria um fluxo de polpa com a qualidade do alvo 1, ou 2.

Coletadas as amostras, foi necessária a avaliação laboratorial para a determinação química e a verificação se um dos alvos foi acertado. Realizou-se diversas amostragens até que fossem encontrados os alvos mostrados na Tabela 5.

Abaixo, na Tabela 5, apresenta-se a informação das qualidades químicas dos alvos e a Tabela 6 mostra as qualidades químicas das amostras coletas e que representam os alvos de amostragem.

Tabela 5: Teores alvos para amostragem de minérios para comprovação em laboratório dos efeitos dos contaminantes na resposta sílica no produto.

Amostras de minério coletadas na usina segundo os padrões verificados na análise de k-médias		
Teores	Alvo 01: determinações de qualidade para representação dos tipos de 1 a 5	Alvo 02: determinações de qualidade para representação dos tipos de 6 a 8
Fe	< 53%	>53%
SiO <sub>2</sub>	>20%	<20%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<1,4%	>1,4%
P	~0,06%	~0,06%
Mn	<0,07%	>0,07%
MgO	<0,07%	>0,07%

Tabela 6: Amostras coletadas em usinas. Pode-se observar que após a determinação química as amostras 01, 02 e 03 atendem as especificações do alvo 1 e a amostra 04 atende as especificações do alvo 2.

Amostras geradas em usina segundo os padrões verificados na análise de k-médias				
Item	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04
Fe	48,40%	48,60%	48,90%	51,30%
SiO <sub>2</sub>	25,40%	26,10%	25,50%	18,40%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,95%	0,91%	1,16%	2,29%
P	0,05%	0,05%	0,04%	0,07%
Mn	0,05%	0,06%	0,04%	<0,1
MgO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

A Tabela 6 mostra o resultado da determinação química das amostras coletadas na usina ao longo de vários dias. Pode-se verificar que as amostras apresentadas nas três primeiras colunas têm características químicas próximas ao alvo 1 da tabela 4, e desse modo, e com base em nossa hipótese, seriam amostras que, após tratadas em usina, resultariam em uma qualidade de produto dentro da especificação requerida pela pelotização.

Já a amostra 4 da Tabela 6 teria um padrão semelhante àquele encontrado na segunda categoria da Tabela 4 e, assim, a hipótese é que após sua concentração em usina deveria resultar em um contaminante no produto acima da especificação do cliente, ou seja acima de 3,2% de sílica no produto.

Após amostragem das duas categorias de minérios, as amostras foram levadas ao laboratório, onde se pode testar se a hipótese levantada poderia ser verificada em testes em escala laboratorial de flotação (Tabela 7).

Tabela 7: Resultado químico após testes de bancada (laboratório) para cada tipo de minério coletado.

Amostra	Contaminante no produto (Sílica)
Amostra 1	1,20%
Amostra 2	0,67%
Amostra 3	1,05%
Amostra 4	3,50%

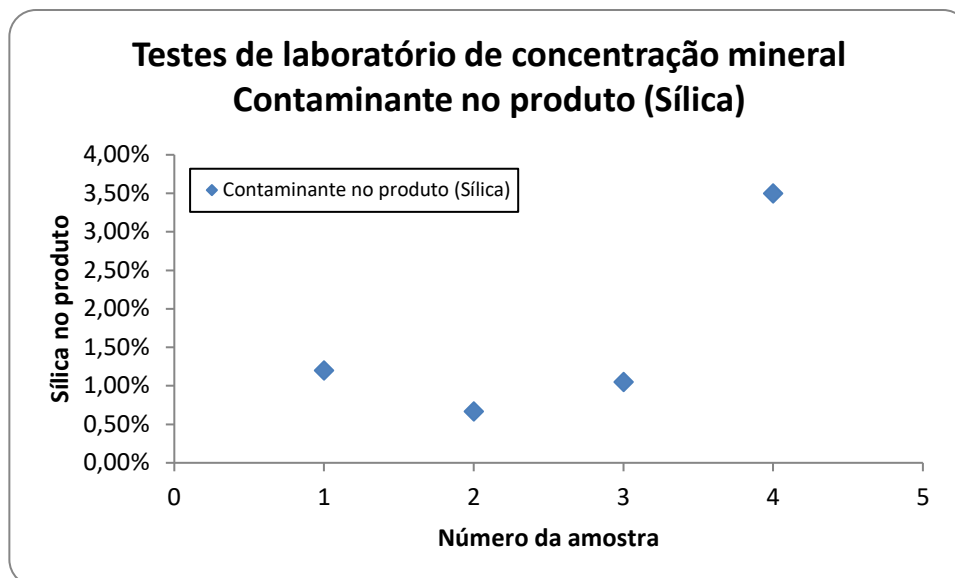


Figura 23: Valor de contaminante no produto após simulação laboratorial de concentração mineral do minério de ferro.

Pode-se verificar através dos testes em flotação em escala laboratorial que a amostra que representa a segunda categoria, sob as mesmas condições de operação industrial resultou em um valor de sílica acima da especificação do cliente, valor de sílica para esta amostra foi de 3,5%, este valor está próximo dos valores detectados pela análise de k-médias para a categoria 2. A Figura 23 mostra o resultado de sílica no produto após o teste de flotação para as quatro amostras

Teste com as outras amostras indicam que o valor de contaminante pode ser alcançado com o padrão industrial atual, ou seja, o atual padrão pode resultar em um produto com sílica abaixo de 3,2% e assim atender o cliente. A média de sílica após a flotação em bancada para as amostras que representam a categoria 1 teve uma média de 1% de sílica no produto.

Avançando nos testes de laboratório foi verificada também a hipótese de se obter um reagente que pudesse ampliar a atuação do padrão industrial para tratamento do minério da categoria 2. Para isso, foram testados outros nove reagentes com bases químicas diferentes. Os resultados estão apresentados na Figura 24.

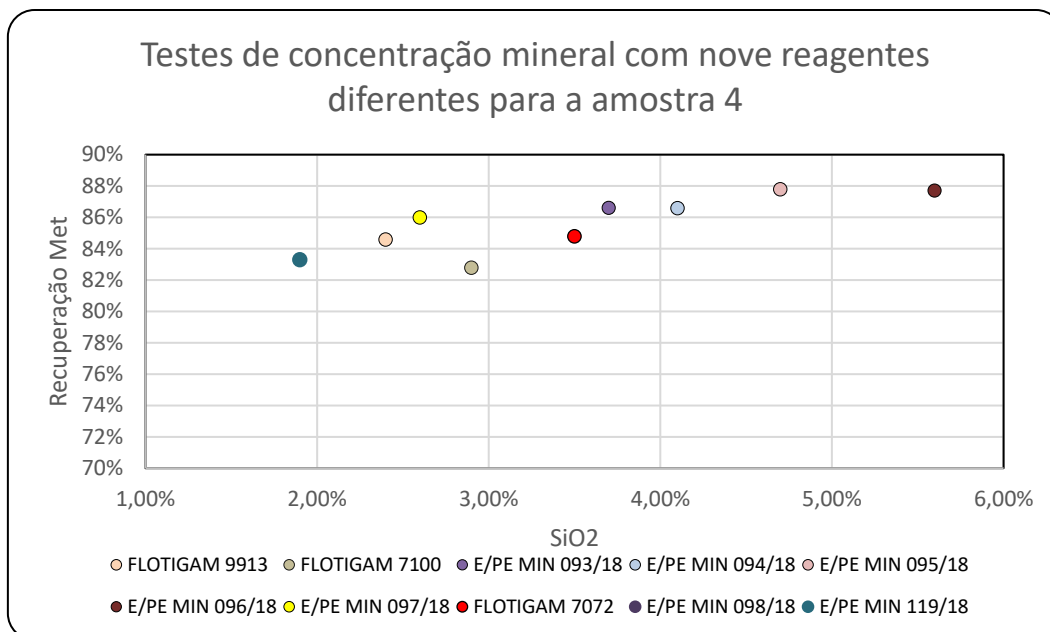


Figura 24: Resultados de sílica no produto após tratamento com diversos reagentes químicos.

O ponto vermelho no gráfico apresenta o resultado de contaminante no produto utilizando o atual reagente químico, que é empregado no processo industrial. Para o alvo 2, este reagente responde com um teor de sílica acima do valor de 3,2%.

Pode-se verificar que existem reagentes químicos que se utilizados poderiam reduzir o nível de contaminante no produto. O reagente químico com a referência na legenda da Figura 24 mostra que a flotação em escala laboratorial da amostra que representa a categoria 2 pode produzir um produto com sílica abaixo de 2%.

## 10 – CONCLUSÕES

O processo industrial é difícil de ser analisado devido às inúmeras variáveis e aos ruídos provenientes da rotina operacional. Foi necessária a retirada de dados correspondentes aos períodos que, sabidamente, ocorreu um evento de parada programada. No entanto, outros eventos podem ter ocorrido e gerado ruídos sem que os responsáveis por analisar os dados tivessem ciência.

A grande variabilidade encontrada nas variáveis poderia ser atribuída a grande variabilidade de litotipos, tipos de minérios que vem da mina e até mesmo de ocorrências ligadas a condições das máquinas, atuadores e sensores.



Pode-se verificar que a técnica estatística de k-medias pôde detectar 8 tipos de variantes do minério, fato ligado à gênese da mina, visto que a mesma tem grandes dimensões, as quais podem atingir mais de 10 km no maior eixo da mina. Além disso, a lavra de contatos entre dois minérios pode ser feita, simultaneamente, à revelia do operador do equipamento de lavra, uma vez que a dimensão deste equipamento é grande e pode lavar duas rochas de características diferentes ao mesmo tempo.

As cartas de controle mostram que, ao longo do tempo, obteve-se um padrão de aumento de contaminantes que poderia responder ao aumento da sílica no produto. Os contaminantes verificados e que tiveram um aumento condizente com o aumento de sílica no produto foram a  $Al_2O_3$ , manganês, e óxido de magnésio.

O padrão industrial poderia ser melhor se houvesse uma mudança de reagentes, a Figura 24 resume os testes em busca de um reagente que melhor reduz a sílica no produto. Como pode ser observado, há um reagente que melhora a condição de contaminante no produto. Porém, os efeitos colaterais seriam o menor rendimento em massa e o custo com o novo reagente, o qual tem um custo 5% maior que o reagente referência – o, atualmente, utilizado para o tratamento do minério na planta estudada.

O reagente que melhor desempenhou a retirada de sílica do produto obteve um valor deste contaminante de 1,9%, o qual é satisfatório em relação a especificação de 3,2%.

Testes industriais poderão ser realizados e direcionados por este estudo para a comprovação dentro da própria indústria do desempenho do produto com a maior retirada de contaminante. Deve-se programar tal evento para verificar esta hipótese.

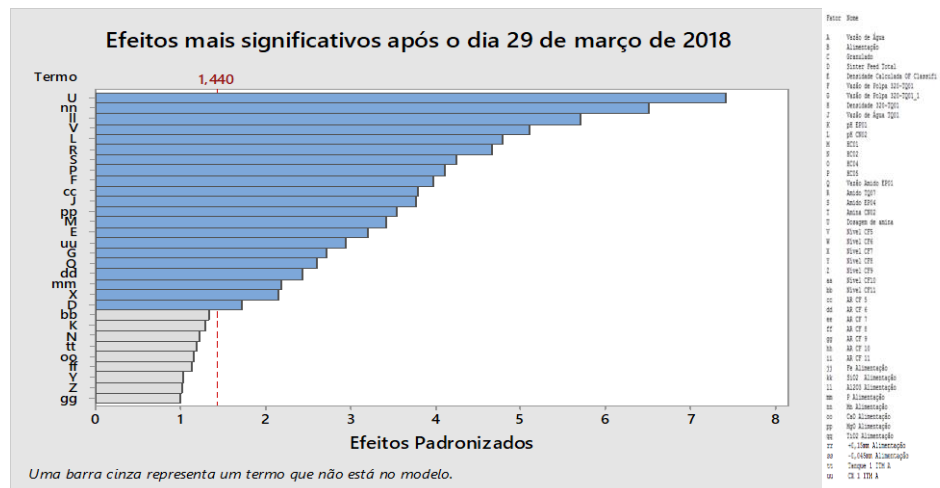
Verificado que, industrialmente, seria possível a aplicação do novo reagente para o tratamento do minério com características da categoria 2, talvez poderia ser operacionalizado com um sistema de injeção de dois reagentes distintos, tanto para o que hoje é aplicado, quanto para o reagente verificado para o padrão de minério da categoria 2, opção para evitar o efeito colateral de recuperação em massa. Atualmente, só existe um sistema de injeção para um reagente.

Inteligência artificial poderia decidir em qual momento dever-se-ia entrar com um determinado reagente, realizando, automaticamente, as análises e enviando comandos para a injeção do melhor reagente e em dosagens corretas para cada categoria.

## APÉNDICE

Variável	Tipo 22	Tipo 23	Tipo 24	Tipo 25	Tipo 26	Tipo 27	Tipo 28	Tipo 29	Tipo 30	Tipo 31	Tipo 32	Tipo 33	Tipo 34	Tipo 35	Tipo 36	Tipo 37
Fluxo saída 2	0,086	0,546	0,193	-0,055	0,072	0,241	0,033	0,228	0,229	-0,331	-0,134	0,374	0,265	0,004	-0,114	0,21
Vazão de Polpa	-0,505	0,407	-0,107	0,004	-0,181	0,21	0,199	0,05	0,073	-0,022	0,127	-0,183	0,086	-0,086	0,382	-0,3
Vazão de Água	-0,111	-0,012	0,332	-0,073	-0,382	-0,1	0,66	-0,03	0,114	0,21	0,048	0,239	-0,36	-0,004	0,039	0,056
pH	0,305	0,236	0,103	0,017	-0,476	0,154	-0,127	-0,098	-0,314	0,345	0,186	0,03	0,27	0,382	-0,215	-0,174
Pressão ciclones 11	-0,008	0,562	0,176	-0,19	0,073	-0,44	0,014	0,327	0,086	-0,093	-0,098	-0,31	-0,097	0,278	0,133	-0,093
Pressão ciclones 12	0,186	0,314	0,036	-0,423	0,238	-0,251	-0,141	-0,172	0,05	0,192	-0,39	-0,253	-0,025	0,009	-0,038	0,254
Pressão ciclones 21	-0,19	0,498	0,198	-0,218	0,029	0,492	-0,239	-0,191	-0,066	0,002	0,016	-0,096	-0,268	-0,052	-0,029	0,291
Pressão ciclones 22	-0,046	0,422	-0,209	-0,429	0,083	0,053	0,098	-0,248	0,204	0,14	-0,318	0,226	0,02	0,074	0,184	0,064
Reagente Amido 1	0,176	0,351	-0,238	-0,305	-0,256	-0,187	0,509	0,098	0,135	-0,137	0,038	0,016	0,147	-0,207	-0,302	0,054
Reagente Amido 2	0,109	0,504	-0,229	0,104	-0,301	-0,044	-0,34	0,085	-0,333	0,169	-0,097	0,072	-0,054	-0,234	0,159	-0,262
Nível coluna 1	0,085	0,148	0,057	0,589	-0,042	-0,065	-0,061	0,142	0,116	0,323	0,004	-0,077	0,073	-0,298	-0,127	0,479
Nível coluna 2	0,031	0,253	-0,044	0,819	-0,019	-0,002	0,16	-0,071	0,176	-0,08	0,05	-0,182	-0,03	0,102	0,029	0,141
Nível coluna 3	-0,017	0,215	-0,067	0,821	-0,031	0,036	0,144	-0,098	0,111	-0,065	0,074	-0,222	0,025	0,099	0,05	0,103
Reagente amina	-0,132	-0,1	0,236	-0,456	-0,283	-0,05	-0,271	0,215	-0,138	-0,01	0,399	-0,253	0,148	-0,227	0,043	0,103
Fe Alimentação	-0,118	-0,034	0,131	0,103	0,184	0,021	-0,038	0,078	0,854	0,224	-0,082	0,06	0,195	-0,042	0,006	-0,219
SiO2 Alimentação	0,116	0,009	-0,115	-0,078	-0,181	-0,003	0,039	-0,072	-0,882	-0,197	0,027	-0,073	-0,172	0,017	0,009	0,201
Al2O3 Alimentação	0,198	0,077	-0,174	-0,196	-0,13	-0,043	-0,154	-0,094	0,605	-0,155	0,511	0,042	-0,097	0,06	-0,116	0,131
P Alimentação	0,256	0,059	-0,038	-0,005	-0,058	0,01	-0,061	-0,141	0,749	0,027	0,129	-0,025	-0,143	-0,109	0,093	-0,129
Mn Alimentação	0,569	-0,162	0,225	-0,072	-0,163	0,044	0,125	-0,28	0,159	-0,183	-0,111	-0,154	0,202	-0,121	0,53	0,004
CaO Alimentação	0,463	-0,168	-0,164	-0,182	0,117	0,453	0,191	0,531	0,147	0,157	-0,042	-0,159	-0,209	0,088	0,145	0,038
MgO Alimentação	-0,184	-0,079	-0,097	-0,448	0,066	0,171	0,295	-0,179	0,318	0,066	0,232	-0,429	0,148	0,047	-0,268	0,06
TiO2 Alimentação	0,033	0,107	-0,01	0,015	-0,087	-0,132	-0,352	0,001	0,626	-0,083	0,432	0,131	-0,242	0,074	0,026	-0,01
+0,15mm Alimentação	0,166	0,241	-0,007	-0,085	0,465	-0,113	0,203	-0,084	-0,378	0,226	0,53	0,107	-0,004	-0,142	0,104	-0,075
-0,045mm Alimentação	-0,092	-0,223	-0,088	-0,067	-0,411	-0,02	-0,126	0	0,476	0,011	-0,588	-0,102	-0,101	-0,056	-0,128	0,025
SiO2 Produto	-0,248	-0,221	-0,192	-0,167	-0,146	-0,122	-0,029	0,094	0,109	0,135	0,152	0,169	0,186	0,197	0,455	0,59

Apêndice 1: Análise de componentes principais.



Apêndice 2: Determinação de efeitos mais significativos para o processo industrial de flotação.



Apêndice 3: Referência de dimensão para as pelotas de minério de ferro.



Apêndice 4: Referência de dimensão para as partículas de *Lump Ore* de minério de ferro.



Apêndice 5: Referência de dimensão para as partículas de *pellet feed* de minério de ferro.



Universidade Federal de Minas Gerais  
 Instituto de Ciências Exatas  
 Departamento de Estatística  
 Programa de Pós-Graduação / Especialização  
 Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha  
 31270-901 – Belo Horizonte – MG

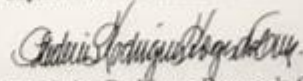
E-mail: pgest@ufmg.br  
 Tel: 3409-5923 – FAX: 3409-5924

**ATA DO 192º. TRABALHO DE FIM DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA DO ALTIERES MARÇAL FRADE.**

Aos quatorze dias do mês de novembro de 2018, às 15:00 horas, na Sala 2076 do Instituto de Ciências Exatas, reuniram-se os professores abaixo relacionados, formando a Comissão Examinadora homologada pela Comissão do Curso de Especialização em Estatística, para julgar a apresentação do trabalho de fim de curso do aluno **Altieres Marçal Frade**, intitulado: **“Análise multivariada de um processo industrial de concentração de minério de ferro”**, como requisito para obtenção do Grau de Especialista em Estatística. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Luiz Henrique Duczmal – Orientador, após dar conhecimento aos presentes do teor das normas regulamentares, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores com a respectiva defesa do candidato. Após a defesa, os membros da banca examinadora reuniram-se sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foi atribuída a seguinte indicação: o candidato foi considerado Aprovado condicional às modificações sugeridas pela banca examinadora no prazo de 30 dias a partir da data de hoje por unanimidade. O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente Ata, que será assinada por todos os membros participantes da banca examinadora. Belo Horizonte, 14 de dezembro de 2018.

  
 Prof. Luiz Henrique Duczmal (Orientador)  
 Departamento de Estatística / UFMG

  
 Prof. Roberto Costa Quinino  
 Departamento de Estatística / UFMG

  
 Prof. Frederico Rodrigues Borges da Cruz  
 Departamento de Estatística / UFMG

  
 Jean Cláudio Menezes de Bem  
 VALE S.A.



Universidade Federal de Minas Gerais  
 Instituto de Ciências Exatas  
 Departamento de Estatística  
 Programa de Pós-Graduação  
 Caixa Postal 702  
 31270-901 Belo Horizonte - MG - Brasil

Telefone: (31) 3499-5923  
 Fax: (31) 3499-5924  
 E-mail: [ppes@ufmg.br](mailto:ppes@ufmg.br)  
 WEB: <http://www.est.ufmg.br/posgrad/>

DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA – ICEX/UFMG

Altieres Marçal Frade – 14/12/2018, às 15:00 horas

NOTA DA APRESENTAÇÃO DO TRABALHO DE FIM DE CURSO  
 “ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA – UFMG”

BANCA:

PROFESSOR (A)	NOTA(0-100)	ASSINATURA
Prof. Luiz Henrique Duczmal (Orientador)	100	<i>L.H.D.</i>
Prof. Roberto Costa Quinino	100	<i>R.C.Q.</i>
Prof. Frederico Rodrigues Borges da Cruz	100	<i>F.R.B.</i>
Jean Cicero Menezes de Bem	100	<i>J.C.M.</i>
<b>MÉDIA</b>	100	<i>L.H.D.</i>

Trabalho intitulado: “Análise multivariada de um processo industrial de concentração de minério de ferro”.

Apêndice 7: Nota da apresentação do trabalho de fim de curso “Especialização em Estatística - UFMG” – Altieres Marçal Frade



## GLOSSÁRIO

**Minério:** Um mineral natural que pode ser minerado e tratado para a extração de qualquer de seus componentes (sejam metálicos ou não) em uma operação rentável.

**Minério de ferro:** Mineral que contém ferro suficiente para se tornar uma fonte comercialmente viável deste elemento para uso na siderurgia. Exceto no caso de fragmentos de meteoritos encontrados na Terra, o ferro não é um elemento livre; em vez disso, ele encontra-se na crosta terrestre em sua forma oxidada.

**Rocha:** Agregado de um ou mais minerais.

**Sílica:** Óxido de silício. No minério de ferro é encontrado em forma de cristal mineral, que é conhecido como quartzo.

**Flotação:** Processo de concentração mineral que utiliza as propriedades físico-químicas de superfície dos minerais para a realização da separação de fases minerais.

**Amina:** Reagente coletor utilizado em flotação de minério de ferro e que altera a característica de superfície do mineral quartzo (sílica) o tornando hidrofóbico.

**Lavra:** Operação da mineração que compreende as atividades de escavação, carregamento em equipamentos e transporte de minério, ou de rochas estérteis em uma mina.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, N., JAMESON. **The effect of bubble size on the Rate of flotation fine particles.** Int. J. of Mineral Processing, n. 14, p. 195-215, 1985.

HERNÁNIZ, F., CALERO, M. **Froth flotation: kinetic models based on chemical analogy.** Chem. Eng. and Process, n. 40, p. 269-275, 2001.

FENG, D., ALDRICH, C. **Effect of particle size on flotation performance of complex sulphide ores.** Minerals engineering, v.12, n.7, p. 721-731, 1999.

FILIPPOV, L., FILIPPOVA, I., SEVEROV, V. **Reverse cationic flotation of iron ores – flotability of amphiboles at depression of iron oxides by starch (XXV INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS (IMPC) 2010 PROCEEDINGS / BRISBANE, QLD, AUSTRALIA / 6 - 10 SEPTEMBER 2010)**

LI, R., HOBREG, H., SCHNEIDER, F.U. **Investigations on the Influence of Particle Size in Flotation.** In: international mineral processing congress, 18, Anais... Sydney. p. 689-697, 1993.

MINGOTI, S. A., **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: Uma abordagem aplicada.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

SANTOS, E. P. **Alternativas para o tratamento de ultrafinos de minério de ferro da Mina do Pico/MG por flotação em coluna.** 2010. 136p. Dissertação Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porta Alegre, 2010.

SILVA, K. R. R. **A Análise multivariada aplicada na seleção de fundos de renda variável. 2017.** Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estatística da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título Especialista em Estatística.