



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos em Mineração - PROFICAM
Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas
Associação Instituto Tecnológico Vale**

Dissertação

**SISTEMA DE CONTROLE GRANULOMÉTRICO DE PELOTAS DE
MINÉRIO DE FERRO**

Ítalo da Silva Magalhães Dias

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2018**

Ítalo da Silva Magalhães Dias

**SISTEMA DE CONTROLE GRANULOMÉTRICO DE PELOTAS DE
MINÉRIO DE FERRO**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. D.Sc. Marcone Jamilson Freitas Souza (UFOP).

Coorientador: Prof. D.Sc. Frederico Gadelha Guimarães (UFMG).

Ouro Preto

2018

D541s Dias, Ítalo da S. M.
 Sistema de Controle Granulométrico de Pelotas de Minério de Ferro
 [manuscrito] / Ítalo da S. M Dias. - 2018.
 95f.: il.: color; grafis; tabs.

 Orientador: Prof. Dr. Marcone J. F. S.
 Coorientador: Prof. Dr. Frederico G. G.

 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais. Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.
 Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Minerais.

 1. Granulometria. 2. Minério de Ferro - Pelotamento. 3. Pelotização. I. S, Marcone J. F.. II. G, Frederico G.. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 681.5-622.2

Catálogo: www.sisbin.ufop.br

Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos
de Mineração - PROFICAM

Sistema de Controle Granulométrico de Pelotas de Minério de Ferro

Ítalo da Silva Magalhães Dias

Dissertação defendida e aprovada em 22 de novembro de 2018 pela banca
examinadora constituída pelos professores:



D.Sc. Marcone Jamilson Freitas Souza
Orientador – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



D.Sc. Frederico Gadelha Guimarães
Coorientador – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)



D.Sc. Agnaldo José da Rocha Reis
Membro interno – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



D.Sc. Silvia Grasiella Moreira Almeida
Membro externo – Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG

Dedico este trabalho à minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo apoio e incentivo.

Aos meus orientadores pelo apoio, paciência e disponibilidade.

Aos amigos e colegas que fizeram parte deste trabalho.

Às equipes de operação, processo e manutenção que ajudaram no desenvolvimento dos testes.

À equipe de automação da Pelotização da Mina de Fábrica, em especial ao meu amigo Luiz Armando, pela ajuda no desenvolvimento das lógicas de controle e no acompanhamento dos testes.

Ao meu amigo e colega de trabalho e classe Ronan Alves, pelo apoio nas disciplinas durante o mestrado.

Ao meu gestor José Venâncio pelo apoio e pela disponibilidade.

À Capes, pela disponibilização do Portal de Periódicos e apoio aos programas de pós-graduação.

A todos que direta, ou indiretamente, propiciaram o desenvolvimento deste trabalho.

*“Todo grande progresso da ciência resultou de
uma nova audácia da imaginação”*

(John Dewey)

RESUMO

Resumo da Dissertação apresentada à Escola de Minas/UFOP e ao ITV como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SISTEMA DE CONTROLE GRANULOMÉTRICO DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO

Ítalo da Silva Magalhães Dias

Novembro/2018

Orientadores: Prof. D.Sc. Marcone Jamilson Freitas Souza (UFOP)

Prof. D.Sc. Frederico Gadelha Guimarães (UFMG)

Esta dissertação tem seu foco no estudo de um sistema de controle para um processo de pelotamento de minério de ferro, manipulando variáveis do processo, tais como velocidade de rotação dos tambores de pelotamento, injeção de água e alimentação. O objetivo é propor um controle granulométrico das pelotas e, assim, tornar o processo mais uniforme, evitar retrabalhos, e o conseqüente aumento de custos operacionais. Para alcançar esse objetivo é analisado o comportamento atual do processo para identificar e quantificar diversas variáveis por meio do Sistema Gerenciador de Informações da Planta e aplicação de testes, tal como resposta ao degrau para obtenção do modelo do processo e, posteriormente, identificar estratégias aplicáveis ao controle e, em seguida, aplicar as melhorias necessárias. Para implantação do sistema proposto são utilizadas ferramentas já existentes na planta, como controladores lógicos, sistema de supervisão e sistema de historiamto. O estudo propõe um controle PID em cascata para maximização de determinada faixa granulométrica. Com a aplicação do controle é alcançado o atendimento a determinado cenário.

Palavras-chave: Controle granulométrico, Pelotamento de minério de ferro, Pelotização de minério de ferro.

ABSTRACT

Abstract of Dissertation presented to Escola de Minas/UFOP and ITV as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THESIS TITLE

Ítalo da Silva Magalhães Dias

November/2018

Advisors: Prof. D.Sc. Marcone Jamilson Freitas Souza (UFOP)

Prof. D.Sc. Frederico Gadelha Guimarães (UFMG)

This thesis is focused on a study related to a control system for iron ore pelletizing process, handling process variables, such as drums rotation speed, water addition and feeding. The goal is to propose pellet granulometry control and make the process more uniform, avoiding both reworks and the incremental of operational costs. To achieve this goal is analyzed the actual process behavior to identify and quantify the number of variables using a Plant Information Management System and applying tests, such as step response to get the process model. After that, the strategy applicable for the control are identified and the needed improvements are applied. In order to implement the proposed system, existing tools are used in the plant, such as logic controllers, supervision system and historian system. The study proposes a cascade PID control to maximize a certain granulometric range. With the application of the control, the attendance to a certain scenario is met.

Keywords: Granulometric Control, Iron ore balling, Iron ore pelletizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de Pelotização da Mina de Fábrica.....	2
Figura 2: Etapa de Pelotamento da Mina de Fábrica.....	4
Figura 3: Diagrama simplificado do pelotamento	4
Figura 4: Diagrama do tambor de pelotamento	6
Figura 5: Diagrama de formação das pelotas no tambor	11
Figura 6: Interface do sistema de medição granulométrica.....	18
Figura 7: Interface do granulômetro com o sistema supervisório	19
Figura 8: Comportamento da média granulométrica no teste de alimentação: 1º cenário, degrau 92 t/h para 80 t/h	22
Figura 9: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de alimentação: 1º cenário, degrau 92 t/h para 80 t/h.....	22
Figura 10: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de alimentação: 1º cenário, degrau 92 t/h para 80 t/h.....	23
Figura 11: Comportamento da taxa de retorno no teste de alimentação: 1º cenário, degrau 92 t/h para 80 t/h.....	23
Figura 12: Comportamento da média granulométrica no teste de alimentação: 2º cenário, degrau 93 t/h para 80 t/h	24
Figura 13: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de alimentação: 2º cenário, degrau 93 t/h para 80 t/h.....	25
Figura 14: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de alimentação: 2º cenário, degrau 93 t/h para 80 t/h.....	25
Figura 15: Comportamento da taxa de retorno no teste de alimentação: 2º cenário, degrau 93 t/h para 80 t/h.....	26
Figura 16: Comportamento da granulometria média no teste de rotação: 1º cenário	27
Figura 17: Comportamento do percentual retido em 12,5 mm no teste de rotação: 1º cenário	27

Figura 18: Comportamento do percentual retido em 10 mm no teste de rotação: 1º cenário	28
Figura 19: Comparação entre as faixas retidas de 10mm e 12,5mm: 1º cenário.....	28
Figura 20: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 1º cenário.....	29
Figura 21: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz	30
Figura 22: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz	30
Figura 23: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz.....	31
Figura 24: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz.....	31
Figura 25: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz	32
Figura 26: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz	32
Figura 27: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz.....	33
Figura 28: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz.....	33
Figura 29: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz	34
Figura 30: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz	34
Figura 31: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz.....	35
Figura 32: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz.....	35

Figura 33: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz	36
Figura 34: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz	36
Figura 35: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz.....	37
Figura 36: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz.....	37
Figura 37: Comportamento da granulometria média no teste de rotação: 2º cenário	39
Figura 38: Comportamento do percentual retido em 12,5 mm no teste de rotação: 2º cenário	39
Figura 39: Comportamento do percentual em 10 mm no teste de rotação: 2º cenário	40
Figura 40: Comparação entre faixas retidas de 10mm e 12,5mm: 2º cenário	40
Figura 41: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 2º cenário.....	41
Figura 42: Influência da vazão de água no teste de rotação: 2º cenário	41
Figura 43: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz	42
Figura 44: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz	42
Figura 45: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz.....	43
Figura 46: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz.....	43
Figura 47: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz	44
Figura 48: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz	44

Figura 49: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz.....	45
Figura 50: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz.....	45
Figura 51: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz	46
Figura 52: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz	46
Figura 53: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz.....	47
Figura 54: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz.....	47
Figura 55: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz	48
Figura 56: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz	48
Figura 57: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz.....	49
Figura 58: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz.....	49
Figura 59: Influência do degrau na abertura da válvula.....	50
Figura 60: Comportamento da vazão ao longo do tempo	51
Figura 61: Vazão – resposta ao degrau	52
Figura 62: Comportamento da média granulométrica no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 5 l/min	54
Figura 63: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 5 l/min	54

Figura 64: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 5 l/min.....	55
Figura 65: Comportamento da taxa de retorno no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 5 l/min.....	55
Figura 66: Comportamento da média granulométrica no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 7 l/min	56
Figura 67: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 7 l/min	57
Figura 68: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 7 l/min.....	57
Figura 69: Comportamento da taxa de retorno no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 7 l/min.....	58
Figura 70: Comportamento da média granulométrica no teste de vazão: 2º cenário, degrau 2 l/min para 9 l/min	59
Figura 71: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de vazão: 2º cenário, degrau 2 l/min para 9 l/min	60
Figura 72: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de vazão: 2º cenário, degrau 2 l/min para 9 l/min.....	60
Figura 73: Comportamento da taxa de retorno no teste de vazão: 2º cenário, degrau 2 l/min para 9 l/min.....	61
Figura 74: Diagrama do controle em cascata	63
Figura 75: Degrau de vazão: 3 l/min para 7 l/min	65
Figura 76: Comportamento da granulometria em relação ao degrau de vazão	65
Figura 77: Resposta da granulometria em relação ao degrau de vazão	66
Figura 78: Simulação do controlador em cascata	67
Figura 79: Variação do <i>setpoint</i> na simulação do controlador em cascata	68
Figura 80: Comportamento do processo com o controlador em cascata	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do minério no primeiro cenário	21
Tabela 2: Características do minério no segundo cenário.....	24
Tabela 3: Características do minério no primeiro cenário de vazão.....	53
Tabela 4: Características do minério no segundo cenário de vazão	58
Tabela 5: Características do minério para o controlador	64

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CLP – Controlador Lógico Programável

MATLAB – Matrix Laboratory

PI – Proporcional e Integral

PID – Proporcional, Integral e Derivativo

PIMS – Plant Information Management System

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Caracterização do processo	2
1.2	Motivação	7
1.3	Objetivo	7
1.4	Metodologia de pesquisa	7
1.5	Estrutura do trabalho	8
2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
4.1	Equipamentos.....	17
4.2	Funcionalidades do processo	19
4.3	Experimentos preliminares	20
4.3.1	Variação da taxa de alimentação	21
4.3.2	Variação da rotação do tambor.....	26
4.3.3	Variação da vazão de água.....	50
4.3.4	Considerações dos testes de preliminares	61
4.4	Proposta	62
5	TESTE OPERACIONAL.....	68
6	CONCLUSÕES	71
7	TRABALHOS FUTUROS	73
8	PRODUÇÕES OBTIDAS.....	74
	REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

A busca pelo aperfeiçoamento dos processos produtivos deve ser sempre perseguida nos segmentos industriais. Na mineração vários desafios são enfrentados, principalmente na obtenção de uma melhor qualidade do minério, visto a grande variabilidade que existe em diferentes jazidas e também nos diferentes processos utilizados para recuperar e concentrar o minério de ferro.

Dentre os processos que envolvem toda a cadeia produtiva da mineração de minério de ferro, está o de pelotização. Nele busca-se a melhoria da qualidade e a uniformidade do produto para atender aos padrões exigidos, assim como, indiretamente, a maximização da produção e a consequente minimização dos custos de processo.

A Vale S/A é líder no mercado de pelotas de minério de ferro, possuindo oito usinas no complexo de Tubarão no Estado do Espírito Santo, uma em São Luís no Estado do Maranhão e duas no Estado de Minas Gerais.

O trabalho abordado neste trabalho tem seu foco na planta de pelotização da Mina de Fábrica, uma das usinas de pelotização da Vale no Estado de Minas Gerais. Essa usina possui uma particularidade em relação às outras usinas da empresa, que é o fato de o pelotamento utilizar tambores, e não discos, como nas outras plantas de pelotização da Vale.

A cada dia o mercado mundial se torna mais competitivo e, conseqüentemente, exige maior qualidade dos produtos de modo geral. Da mesma forma é o mercado de pelotas de minério de ferro, no qual a busca pela qualidade no processo de pelotização é fundamental, pois as características físicas e químicas das pelotas incidem diretamente na qualidade de seus derivados.

Uma forma de melhorar o processo é garantir tanto a qualidade do produto, quanto sua uniformidade, mantendo as pelotas de minério em faixas adequadas de qualidade e granulometria, de forma a evitar retrabalhos e, assim, garantir melhor desempenho operacional e redução de custos do processo produtivo. O trabalho aqui proposto busca analisar o processo de pelotamento e propor soluções para os problemas relacionados à granulometria.

1.1 Caracterização do processo

O processo de pelletização consiste em recuperar os finos, que são minúsculas partículas de minério de ferro. De acordo com Pietsch (1991), a pelletização é o processo que envolve aglomeração de pequenas esferas (pelotas) e possui uma etapa para endurecimento destas por meio de calor. Segundo Meyer (1980), as pelotas são esferas produzidas a partir de concentrados de minérios de ferro de diferentes composições mineralógicas e químicas com algumas propriedades notáveis, tais como:

- Diâmetro em uma faixa de 9 a 15 mm;
- Alta porosidade, em uma faixa de 25 a 30%;
- Teor de ferro superior a 63%;
- Baixa perda de ignição;
- Alta resistência mecânica;
- Resistência à abrasão em um valor adequado, evitando perdas no transporte;
- Resistência mecânica suficiente mesmo em estresse térmico sob atmosfera redutora.

Pelo processo de pelletização, o minério irá aglomerar uma quantidade de material mais concentrado, gerando desta forma um produto com maior valor agregado e que tende a favorecer a melhoria dos processos siderúrgicos, como os de altos fornos.

Na Figura 1 é mostrada a visão geral do fluxo do processo de pelletização da Mina de Fábrica, sendo possível identificar as etapas e a sequência do processo.

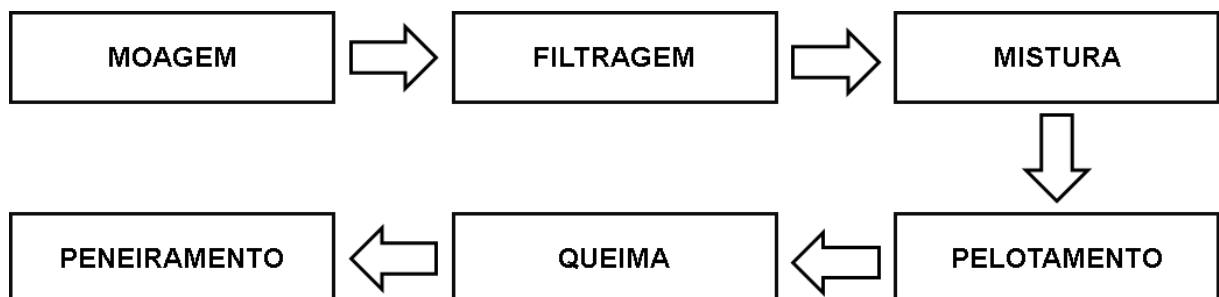


Figura 1: Processo de Pelotização da Mina de Fábrica

A etapa de moagem consiste na cominuição do *pellet feed*. O material proveniente da usina de concentração é colocado nos moinhos juntamente com os corpos moedores (esferas de

ferro e *cylpebs*). De acordo com o movimento de rotação, o material é moído e a granulometria do *pellet feed* diminui.

Na etapa de filtragem ocorre a separação entre a parte sólida e líquida da polpa proveniente da moagem. Com a separação é formado o filtrado sólido (*filter cake*).

Após a filtragem do material ocorre a etapa de mistura, na qual são adicionados alguns insumos, como exemplo o aglomerante (bentonita).

Na etapa de pelotamento ocorre a formação das pelotas.

Na etapa de queima ocorre o endurecimento das pelotas formadas no pelotamento.

No peneiramento ocorre a classificação final do produto. De acordo com a granulometria das pelotas ocorre a devida classificação do material.

Entendendo que o processo de pelotização é composto pelas diferentes etapas apresentadas acima, isto é: moagem, filtragem, mistura, pelotamento, queima e peneiramento, foi definido como foco deste trabalho a etapa de pelotamento. O intuito é desenvolver soluções para o controle desta etapa do processo, com base em análises para identificação de pontos de melhoria e impactos nos processos posteriores à etapa em foco.

Na Figura 2 é apresentada a tela de supervisor da planta da Mina de Fábrica, em que se mostra a etapa de pelotamento e os equipamentos componentes.

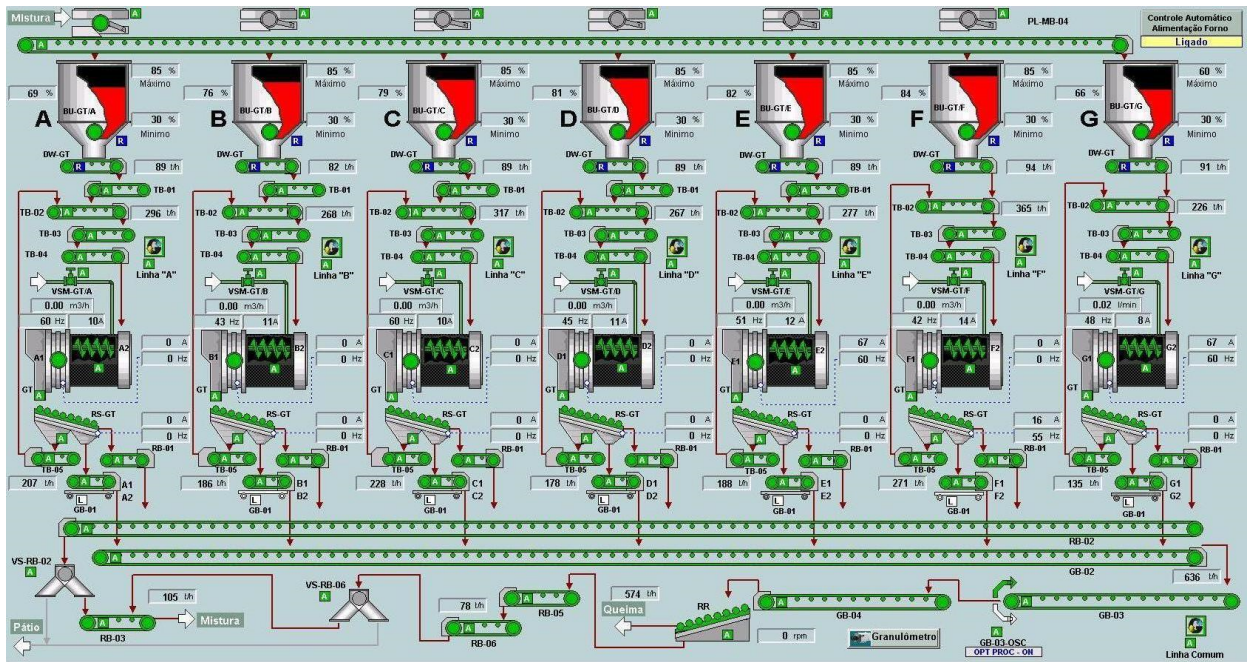


Figura 2: Etapa de Pelotamento da Mina de Fábrica

Segundo Pietsch (1991), o pelotamento é a etapa em que ocorre a aglomeração do material, ou seja, a formação de pelotas verdes (cruas), por meio da rotação deste material em algum equipamento (tambor, ou disco) com a adição de algum tipo de aglutinante. De acordo com a velocidade de rotação, as partículas se colidem e ocorre a aglomeração.

Na Figura 3 é mostrado o diagrama simplificado de uma linha de pelotamento.

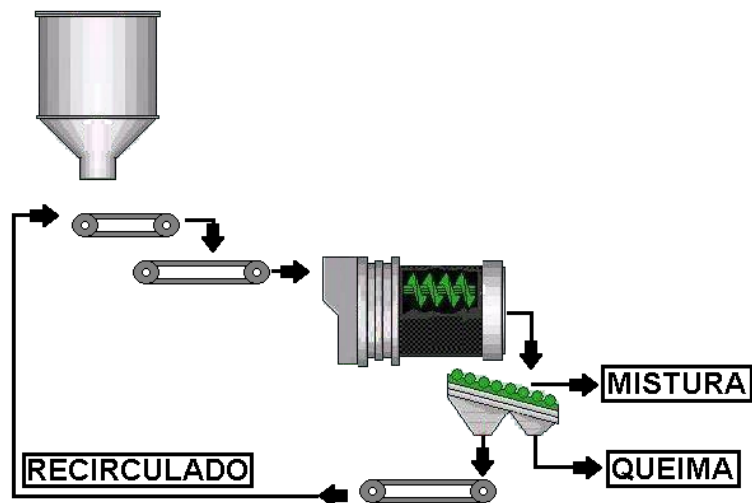


Figura 3: Diagrama simplificado do pelotamento

As pelotas são formadas propriamente nos tambores de pelotamento. Após a formação ocorre a classificação por meio de peneiras de rolos. Estando as pelotas abaixo da granulometria ideal, elas ficam recirculando na linha de pelotamento. Tal material é chamado de recirculado. As pelotas com granulometria acima do ideal retornam para a etapa de mistura e as adequadas seguem para a etapa de queima.

A etapa de pelotamento utiliza um conjunto de equipamentos, tais como:

- Balanças dosadoras: equipamentos responsáveis por alimentar o pelotamento com o material proveniente da mistura, onde foram adicionados insumos para aglomeração;
- Transportadores de correia: utilizados para transportar o minério até a alimentação do tambor de pelotamento;
- Tambor de pelotamento: equipamento responsável pela formação das pelotas. De acordo com a alimentação, velocidade de rotação, adição de insumos e características físicas e químicas do minério, aos poucos, o material é pelotado, e assim passa para a próxima etapa;
- Peneira de rolos classificadora: equipamento responsável por classificar as pelotas de acordo com a granulometria. As pelotas são divididas em 3 grupos, pequenas (retornam para o início do pelotamento), médias (seguem para a etapa de queima), e grandes (voltam para a etapa de mistura).

Os tambores de pelotamento possuem outros componentes que estão diretamente relacionados com o seu funcionamento, como os injetores de água e o raspador (*scraper*).

Na Figura 4 é mostrado um diagrama interno do tambor de pelotamento, e é possível observar os componentes. O material é adicionado no tambor já em movimento de rotação. De acordo com a necessidade é injetada água. Os raspadores atuam para retirar o excesso de material que fica nas paredes internas do tambor.

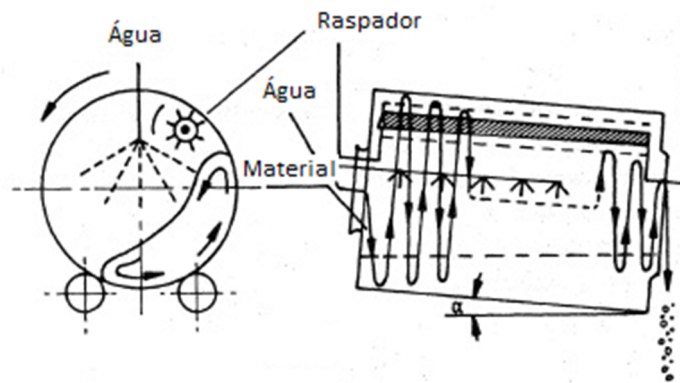


Figura 4: Diagrama do tambor de pelotamento

Para o pelotamento devem ser levadas em consideração algumas características do minério e do processo, tais como:

- Quantidade de insumos adicionados para aglomeração do minério;
- Quantidade e qualidade do minério utilizado;
- Umidade do material;
- Velocidade de rotação do tambor para formação das pelotas;
- Injeção de água no processo, que é utilizada como fator de correção para adequar a granulometria, quando necessário.

Além disso, devem ser considerados os impactos da manipulação de determinados insumos em todos os processos. Um exemplo é o fato de a injeção de água aumentar a umidade da pelota e, por consequência, exigir maior consumo de gás natural na fase de queima.

Atualmente a injeção de água nos tambores de pelotamento é feita com operação manual, ficando o controle diretamente relacionado ao conhecimento do operador. A frequência do inversor, responsável pelo controle de velocidade de rotação dos tambores, é fixa em 60 Hz, o que limita a interação como a manipulação da velocidade de rotação para obter diferentes resultados, ou seja, diferentes granulometrias.

A frequência é mantida fixa por serem necessários estudos mais aprofundados relacionados à influência da velocidade de rotação e, por alguns paradigmas que envolvem a utilização do inversor de frequência, como os harmônicos.

A automação da injeção de água possibilita a análise de estratégias de controle que sejam adequadas às necessidades do processo. Estudando e identificando os impactos da manipulação da rotação do tambor e do *setpoint* das balanças, responsáveis pela alimentação do processo, é possível analisar, juntamente com os impactos da manipulação da injeção de água, a variabilidade no processo e, posteriormente, definir métodos de controle adequados à aplicação.

De acordo com os indicadores de desempenho do processo e com as respostas obtidas com a manipulação das variáveis diretamente ligadas à formação de pelotas, os resultados serão quantificados e posteriormente reinseridos na interface, criando um ciclo de controle. A ideia, a princípio, é aplicar esta proposta em uma linha de pelotamento e, de acordo com os resultados, aplicar nas demais linhas.

Ao garantir a melhoria da etapa de pelotamento por meio do controle da granulometria, contribui-se para a melhoria de todo o processo de pelotização.

1.2 Motivação

Atualmente o processo de pelotamento na Mina de Fábrica é feito apenas com base na experiência e conhecimento do operador. No entanto, mesmo operadores experientes não conseguem manter a uniformidade do tamanho das pelotas, o que gera retrabalho e, conseqüentemente, aumento do custo de produção. A motivação para a realização da presente proposta é a possibilidade de contribuir para a melhoria desse processo, ao automatizá-lo com a utilização de ferramentas de controle.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem como principal objetivo propor um sistema de controle para diminuir a variabilidade do tamanho das pelotas de forma a manter o tamanho médio em uma faixa adequada aos parâmetros de qualidade, aumentar a homogeneidade e, por consequência, diminuir a taxa de retorno de pelotas malformadas.

1.4 Metodologia de pesquisa

Para alcançar o objetivo apresentado este trabalho foram consideradas as seguintes etapas:

- i) Realização de levantamento bibliográfico em artigos, livros, dissertações e teses que envolvam o problema apresentado ou que, de alguma forma, estão relacionados com as necessidades desta proposta;
- ii) Estudo de métodos pertinentes ao problema tratado;
- iii) Identificação das variáveis e possibilidades de manipulação destas e sua incidência no processo;
- iv) Realização de levantamento histórico de dados do processo;
- v) Realização de testes manipulando variáveis para observar os impactos no processo;
- vi) Realização de teste com a aplicação de resposta ao degrau para obtenção do modelo do processo;
- vii) Aplicação de testes em simulação para entender o comportamento do controle desenvolvido e posteriormente validá-lo;
- viii) Desenvolvimento de interface com sistema de supervisão para visualização pelos operadores;
- ix) Desenvolvimento de lógica de controle para aplicação real;
- x) Realização de testes operacionais;
- xi) Análise dos resultados obtidos.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho está organizado conforme segue.

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, contendo a contextualização do processo produtivo e uma breve abordagem do problema objeto de pesquisa. Apresenta, também, o objetivo principal e a metodologia usada para desenvolver o trabalho.

O Capítulo 2 tem como foco apresentar o processo de pelotização, detalhando características relacionadas à qualidade, que é diretamente afetada, e os desafios existentes no cenário atual do processo.

O Capítulo 3 traz uma revisão bibliográfica relacionando problemas semelhantes, métodos que podem ser usados para simulação e estratégias de controle que são pertinentes ao problema em foco.

No Capítulo 4 são apresentados os materiais que serão usados, tais como instrumentos, softwares, técnicas de controle, os equipamentos que compõem o processo, os experimentos para avaliar o comportamento do processo, bem como a proposta de controle.

O Capítulo 5 relata o teste operacional e seus resultados.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões, enquanto o Capítulo 7 indica possíveis trabalhos futuros.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O processo de pelletização envolve diversas etapas e é necessário obter o melhor desempenho possível em cada uma delas para que seja obtido um produto que atenda ao mercado de pelotas.

Na etapa de pelletamento é necessário obter uma granulometria que atenda às necessidades dos clientes, mas não somente atender a este objetivo é importante. Outras características físicas e químicas, tais como a abrasão, a compressão e o teor de minério, são de suma importância para obter uma qualidade adequada do produto.

Para garantir um valor médio adequado da granulometria devem ser controladas algumas variáveis que incidem diretamente no processo, tais como a alimentação dos tambores, a injeção de água e também a velocidade de rotação dos tambores. A manipulação de algumas variáveis que modificam a granulometria pode ter impacto em outras características da pelota. Um exemplo é o fato de a injeção de água elevar a umidade do minério e que, dependendo da quantidade injetada, pode ter impactos negativos na etapa posterior, que é a queima das pelotas.

A pelota mais úmida tende a requerer maior quantidade de gás na etapa de queima, elevando custos e também prejudicando algumas características físicas. Além disso, ela eleva a temperatura em determinadas áreas do forno, o que pode implicar em riscos operacionais e causar danos ao forno. Tais danos podem acarretar risco às pessoas que trabalham na área de queima, pois ocorrem inspeções periódicas em que é necessário abrir portas de inspeção, e se a temperatura estiver acima da esperada pode ocorrer algum acidente.

Outra variável do processo importante é a velocidade do tambor. Para ocorrer a aglomeração das pelotas, a velocidade do tambor deve estar em uma faixa adequada, fazendo com que o material fique em uma área favorável à formação de pelotas. Se a velocidade for baixa, o material irá apenas deslizar e com a velocidade muito alta o material irá subir a parte lateral do tambor e cair sobre si mesmo; desta forma, o material também não formará pelotas.

Na Figura 5 é possível observar um diagrama que mostra a região de formação das pelotas e as outras onde ocorre apenas o deslizamento e a queda do material.

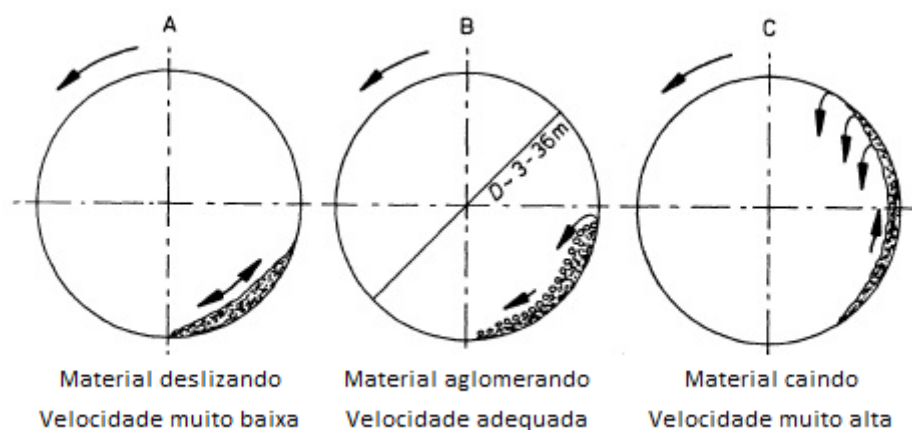


Figura 5: Diagrama de formação das pelotas no tambor

A qualidade do minério que é usado para alimentar a usina de pelotização tem grande influência na qualidade do produto e no desempenho do processo. De fato, diferenças de umidade, teor de minério, superfície específica e densidade do material podem causar oscilações no processo, e tais variações podem causar diversos problemas e não assegurar a qualidade do produto requerido.

Outro fator importante é que, de acordo com as manipulações necessárias para adequar a granulometria, a quantidade de material pelotado pode ser afetada, principalmente quando a alimentação tiver que ser diminuída para que, de alguma forma, a qualidade da linha de pelotamento possa ser melhorada. Sempre são buscadas qualidade e quantidade, e para isso é necessário encontrar parâmetros adequados que atendam a ambos, embora em alguns cenários de processo exista a necessidade de abrir mão da quantidade para melhoria da qualidade, por exemplo.

Quando não ocorre um pelotamento adequado nos tambores também há um aumento das taxas de retorno, que possuem parâmetros toleráveis, mas que quando ultrapassados elevam a quantidade de pelotas não formadas e também destas que ficam recirculando no processo. O retrabalho pode gerar problemas aos equipamentos e, por consequência, aumentar os custos de manutenção e do processo produtivo.

Um ponto relevante para o aumento de custos está relacionado com a heterogeneidade granulométrica do material entregue à etapa de queima. Segundo Chagas *et al.* (2015), havendo maior homogeneidade granulométrica, o consumo de combustível tende a ser menor.

De acordo com Matos (2007), outro fator relacionado à heterogeneidade das pelotas consiste na influência negativa na permeabilidade do forno. A distribuição granulométrica, não estando homogênea, prejudica a etapa de secagem dentro do forno, o que influi em consumo de gás e em características relacionadas à qualidade, como é o caso da abrasão.

Atualmente o pelotamento não possui um sistema automatizado por completo. A partida de alguns equipamentos pode ser feita em modo local, operado em campo pelo operador de área, ou remoto, acionado pelo operador em sala de controle. Esses equipamentos são os transportadores, as balanças, os tambores e as mesas de rolos (classificadores). Há, também, a partida automática desses equipamentos; porém, em relação à injeção de água, não existe qualquer automação, ficando a cargo do operador de área o acionamento quando necessário.

A observação do comportamento do pelotamento em relação à granulometria e a decisão de acionar, ou não, a adição de água, e principalmente a quantidade desta, é feita pelo operador no campo. Por tal motivo o conhecimento baseado na experiência adquirida é fundamental para o processo ter o melhor desempenho possível.

Outro ponto observado para decidir quando e quanto utilizar de água é a observação da taxa de retorno, ou seja, a taxa de pelotas malformadas. Esta observação é feita pelo operador em sala de controle, que acompanha gráficos de tendências e, quando identifica um aumento na taxa de material recirculado, informa ao operador de área a necessidade de adicionar água ao processo.

Devido às diversas circunstâncias que devem ser levadas em consideração e a relação existente entre as diferentes variáveis do processo é necessário entender como o operador toma as decisões para operar o pelotamento e também para melhorar o desempenho do processo.

Analisando as questões apresentadas percebe-se que existem algumas circunstâncias, como a taxa de retorno, que devem ser levadas em consideração para automatizar de forma adequada a injeção de água. As circunstâncias apresentadas incidem diretamente na definição dos métodos para controlar a granulometria das pelotas.

De acordo com Vidal (2015), um sistema de controle consiste de uma interconexão de componentes para produzir uma resposta desejada de acordo com a configuração adotada para o sistema.

Vistas as diversas características do processo, os desafios que representam, e a necessidade de automatizá-lo, é necessária uma estratégia de controle que atenda às necessidades da planta, de forma a garantir menor variabilidade granulométrica e diminuição de custo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

São estudados na literatura diferentes métodos e abordagens em relação ao controle de pelotamento.

Para compor o trabalho é necessário estudar métodos que possam contribuir para o processo como um todo, visando à melhoria de todas as etapas do processo de pelotização, não só o pelotamento. Por isso é importante buscar materiais, artigos, livros, teses e dissertações que mostram aplicações em diversos segmentos industriais que possam contribuir com o desenvolvimento deste trabalho.

Cada vez mais elementos tecnológicos são inseridos em processos de pelotização com o intuito de melhorar a produção, reduzir custos e melhorar a qualidade do produto. Muitas vezes os processos industriais apresentam cenários que exigem uma forte interação humana, e a automação e os métodos de controle surgem no intuito de ajudar a melhorar os processos e trazer recursos que possibilitem sua automatização. Algumas abordagens voltadas para o processo de pelotização envolvem métodos mais clássicos de controle. Borim (2000), por exemplo, aborda o desenvolvimento de controladores PID para ventiladores de processo. Por outro lado, outras abordagens usam métodos mais sofisticados, como é o caso de Monteiro (2004), que propõe a modelagem neural do processo de produção de pelotas, abordando a previsão de abrasão no processo de pelotização.

O comportamento da etapa de pelotamento já é estudado há vários anos. O trabalho de Abouzeid e Seddik (1980) aborda as propriedades do minério de ferro e os impactos em relação à etapa de pelotamento.

Rapp e Nyman (2003) sugerem uma abordagem mais ampla em relação à etapa de pelotamento. Eles contemplam em seu artigo a variação de amplitude do produto na etapa de aglomeração de pelotas e sugerem uma abordagem de todo o processo, e não individualizada por linhas de pelotamento.

O trabalho de Sjoberg *et al.* (1975) consiste no desenvolvimento de um controle de água voltado especificamente para adequar a quantidade de retorno de material no pelotamento. De acordo com as variações de retorno, a adição de água é controlada para estreitar as faixas de retorno, adequando-as a patamares aceitáveis.

Forsmo, Samskog e Bjorkman (2007) estudam características de compressão e plasticidade de pelotas em função das características do minério usado. Segundo o estudo, alguns insumos como, por exemplo, bentonita e coque, podem interferir na qualidade da pelota gerada. A bentonita, como é um aglomerante, pode trazer efeitos indesejados em relação ao tamanho das pelotas; já o coque, sendo um combustível sólido, pode prejudicar a queima das pelotas.

A dissertação desenvolvida por Nunes (2007) traz uma abordagem mais relacionada aos aspectos de qualidade das pelotas. O autor mostra as influências que cargas circulantes do pelotamento podem ter em pelotas verdes e queimadas, e relaciona a qualidade do *pellet feed* utilizado no processo com a qualidade das pelotas geradas.

Portilho (2007), por sua vez, estuda aspectos relacionados à qualidade das pelotas formadas durante a etapa de queima; porém, relaciona essa qualidade à temperatura, pressão, produção e granulometria durante o processo de secagem. O autor infere que a distribuição heterogênea do material interfere negativamente no processo de secagem das pelotas cruas.

Chagas *et al.* (2015) abordam a influência da granulometria na permeabilidade do leito de pelotas. Os autores concluem que quanto mais homogênea é a granulometria da pelota, menor é o consumo de combustível na etapa de queima.

Para quantificar o tamanho das pelotas são necessários instrumentos específicos. Thurley e Anderson (2007) desenvolveram um protótipo para visualização 3D das pelotas para auxiliar na medição, em tempo real, da granulometria das pelotas.

Nunes (2004) fez um estudo da utilização do reconhecimento de imagem para analisar a granulometria e propôs o controle utilizando essas informações de granulometria para atuar na velocidade de rotação do tambor e na injeção de água. Porém, não é aplicada a automatização da injeção de água.

Aplicações desenvolvidas para outras etapas do processo mineral, como por exemplo, na sinterização, também devem ser levadas em consideração. De fato, Arbeithuber, Jörgl e Raml (1995) relacionam a aplicação de controles baseados em controle nebuloso para um processo de sinterização, que também é um processo de aglomeração, como a pelotização.

Outro trabalho que utiliza controle nebuloso é o desenvolvido por Yang *et al.* (2016), que desenvolvem um controle especialista para ventiladores de processo em um forno de

pelotização de minério de ferro. O trabalho busca melhorar a estabilidade térmica do forno. Por sua vez, Borim (2000) desenvolve controladores PID para a etapa de endurecimento de pelotas de minério de ferro focado no controle de temperatura e pressão no forno de pelotização. No trabalho são implementados controladores que atuam na abertura dos *dampers* dos dutos dos ventiladores da etapa de queima, o que mostra que aplicações clássicas também são aplicáveis ao mesmo processo.

É fato que a etapa de pelotamento é de suma importância no processo de pelotização e tem sido tratada, principalmente, com a utilização de tecnologias e métodos voltados para o controle com vistas à melhoria do processo, tanto no aumento da produtividade, quanto na qualidade do produto gerado.

Ao contrário de trabalhos anteriores, nos quais o controle granulométrico não era feito propriamente com a medição de granulometria em tempo real e, sim, baseado na pesagem do material recirculado, como exemplo o trabalho desenvolvido por Sjoberg *et al.* (1975), ou utilizando análises de laboratório defasadas no tempo ou análises de imagens *off-line*, como em Nunes (2004), no presente trabalho propõe-se a utilização da medição granulométrica *online*, por reconhecimento por imagem.

Nos dias atuais já são utilizadas medições em tempo real da granulometria das pelotas por reconhecimento de imagem, o que auxilia no acompanhamento do processo, reduz a necessidade de testes de laboratório, e propicia a utilização das informações na proposição de controles que atuem diretamente no processo. Na empresa na qual é aplicado o presente estudo, já são utilizados alguns controles que utilizam a medição granulométrica, porém esse controle é aplicado em outras unidades, nas quais o processo de pelotamento é feito utilizando discos, e não tambores, como é o caso do presente trabalho.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

No desenvolvimento do trabalho é necessário um conjunto de equipamentos e softwares para realização das automatizações necessárias, e também definir os métodos e estratégias para implementar, passo a passo, os elementos componentes do sistema de controle.

4.1 Equipamentos

O sistema de automação na Mina de Fábrica possui CLP's da Rockwell Automation, tanto dos modelos PLC5, quanto Control Logix 5000, este último utilizado no pelotamento.

O processo possui, também, sistema de supervisão Factory Talk View, que possibilita a operação remota da planta e o sistema de historiameto (PIMS) Infoplus 21. Ele possibilita analisar os dados históricos da planta para identificar a tendência do processo, além de possibilitar análises estatísticas com os dados que são providos.

Em relação à rotação do tambor foi reinstalado o inversor de frequência do modelo Power Flex, da Rockwell.

Para medição de vazão de água foi revitalizado o sistema já existente, que consiste em um medidor eletromagnético.

Quanto à medição da granulometria das pelotas é utilizado o sistema Opt Pellet Vision, também da empresa CEMI Engenharia, que consiste na medição da granulometria por reconhecimento de imagem. O sistema identifica as pelotas que estão no Transportador de Correia logo após a mesa de rolos, onde é feita a classificação, ou seja, a medição é feita observando as pelotas já classificadas. O sistema de medição identifica as pelotas e informa o valor médio destas; além disso, faz uma quantificação do número de pelotas dividindo em faixas. Estas são:

- ≤ 5 mm;
- > 5 mm e $\leq 6,3$ mm;
- $> 6,3$ mm e ≤ 8 mm;
- > 8 mm e ≤ 10 mm;
- > 10 mm e $\leq 12,5$ mm;
- $> 12,5$ mm e ≤ 16 mm;
- > 16 mm e ≤ 18 mm.

Para desenvolvimento deste trabalho foi realizada a calibração do sistema de medição granulométrica. Desta forma, o sistema ganha maior confiabilidade.

O procedimento de calibração consiste em posicionar um objeto de tamanho conhecido que possua dimensões aproximadamente 10 vezes o tamanho das pelotas, ou seja, com tamanho entre 100 mm e 125 mm para que seja feita a medição virtual. No caso, foi utilizada uma capa de CD que tem dimensões aproximadas 125 mm x 140 mm. Após posicioná-la, foi utilizada uma régua virtual (ferramenta do sistema) e em seguida informado ao sistema as dimensões do objeto.

Na Figura 6 é mostrada a interface do sistema de medição granulométrica.

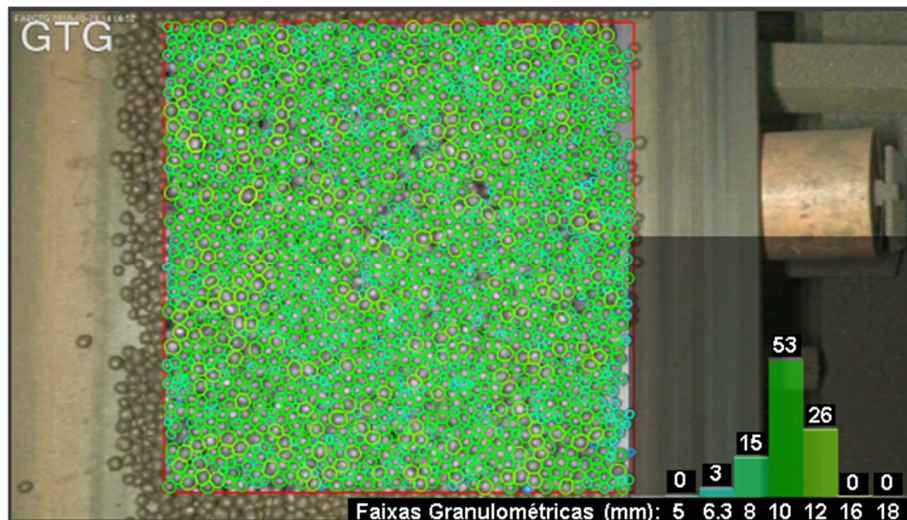


Figura 6: Interface do sistema de medição granulométrica

O operador em sala de controle precisa acompanhar as quantificações relacionadas ao sistema granulométrico. Assim, foi desenvolvida uma tela para mostrar, de forma simplificada, as funcionalidades. Na Figura 7 é mostrada a tela que é usada como interface com o operador.

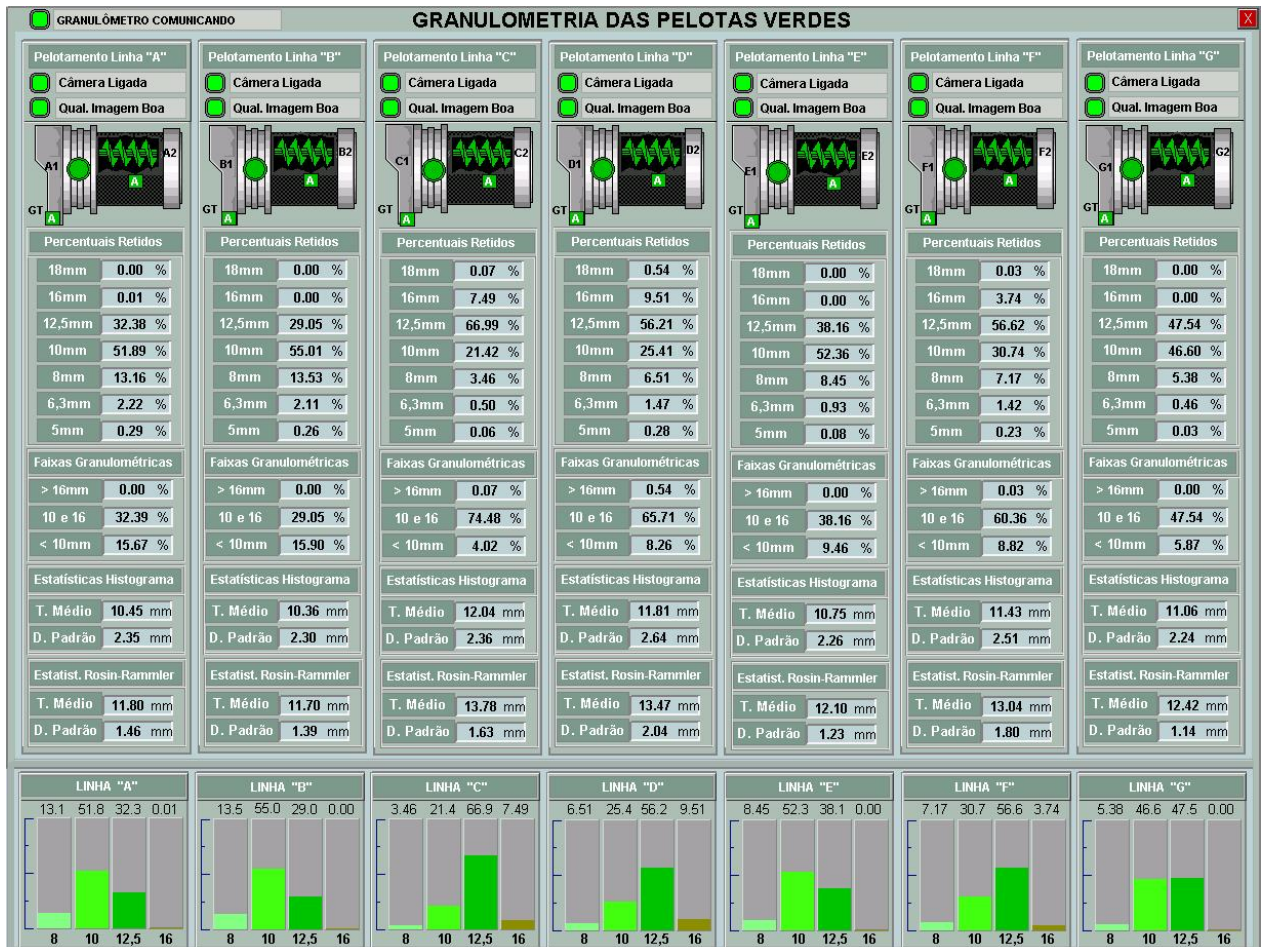


Figura 7: Interface do granulômetro com o sistema supervisório

Para obtenção do modelo do processo, coleta de dados para testes e simulação, é necessária alguma ferramenta matemática que possibilite tais recursos. No caso, foi utilizado o MATLAB, que é um software da Mathworks e oferece os recursos necessários.

4.2 Funcionalidades do processo

A etapa de pelotamento já possui funcionamento local, remoto e automático para algumas funcionalidades. Porém, como já mencionando, a injeção de água fica a cargo do operador.

Para automatizar a injeção de água é necessário fazer a substituição da válvula existente por uma que permita controle. Foi instalada uma válvula de controle do tipo globo, visto a disponibilidade deste equipamento em almoxarifado, evitando a necessidade de compra.

O sistema manual de injeção de água possibilita a adição na alimentação do tambor, na pista (2 pontos, mais interno, próximo da alimentação, e outro mais externo, próximo a saída para a mesa de rolos) e no Transportador de Correia TB-05 (após a classificação, contendo estas as pelotas pequenas que retornarão ao início do pelotamento).

Para a injeção de água, a princípio, foi definido que apenas um dos pontos será automatizado. Esse ponto foi escolhido de acordo com o conhecimento dos técnicos e engenheiros de processo, que optaram por injetar água pelo sistema automatizado. O ponto escolhido foi o mais interno da pista do tambor, próximo à alimentação.

Pelo fato de haver várias relações envolvendo diferentes variáveis para o controle foi definido que, primeiramente, deve-se manipular a rotação e a injeção de água em um ponto. A partir dos resultados obtidos definir os passos para implementar os controles.

Para aplicar o desenvolvimento da lógica de controle, primeiramente é necessário entender o comportamento do processo. Portanto, foram aplicados testes variando a velocidade de rotação do tambor, respeitando os limites operacionais e a vazão de água. De acordo com estas variações espera-se identificar mudanças no processo, tais como:

- Variação da taxa de retorno;
- Variações nas faixas granulométricas;
- Variação no tamanho médio das pelotas.

Com os testes, será possível também, através da aplicação de resposta ao degrau, fazer o levantamento do modelo do processo e, desta forma, simulá-lo.

4.3 Experimentos preliminares

Para compreender o comportamento do processo são necessários alguns testes para avaliar as tendências das variáveis componentes da etapa de pelotamento e que fazem parte da proposta de controle.

Primeiramente foram realizados testes manipulando a alimentação da linha de pelotamento, posteriormente a velocidade de rotação dos tambores de pelotamento e, por fim, a vazão de água que é injetada no processo. Nos testes relatados na Seção 4.3.1 são mantidas fixas a vazão de água, a rotação do tambor, o tipo de material e o aglomerante, e variada a taxa

de alimentação. Na Seção 4.3.2 foram mantidas fixas a alimentação, a vazão de água, o material e o aglomerante, e variada a rotação do tambor. Já na Seção 4.3.3 foram mantidas fixas a alimentação, o material aglomerante e a rotação do tambor, e variada a vazão de água.

4.3.1 Variação da taxa de alimentação

Foram considerados dois cenários, com materiais com diferentes características em relação à superfície específica, umidade e teor de sílica.

a) Primeiro cenário

Este cenário considera o material com as características descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Características do minério no primeiro cenário

Horário	Superfície específica (cm ² /g)	Umidade <i>filter cake</i> (%)	SiO ₂ (%)
04:00	1150		4,93
06:00	1160		5,54
07:00			5,22
08:00	1210	11,48	
10:00	1160	11,08	5,04
11:00			5,25
12:00	1140	11,04	

Para o teste não houve a adição de água e foram fixadas as seguintes variáveis:

- Frequência de rotação do tambor em 60 Hz;
- Dosagem de aglomerante (bentonita) em 0,62%.

Foi variada a taxa de alimentação de 92 t/h para 80 t/h.

Na Figura 8 é apresentado o gráfico da média granulométrica mediante o degrau.

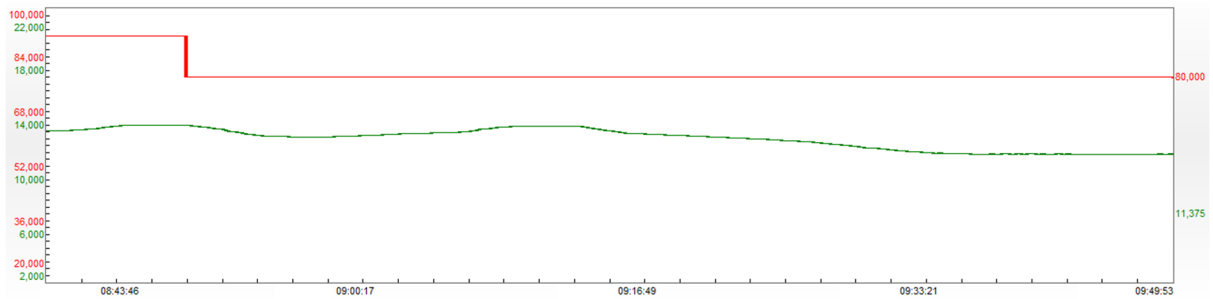


Figura 8: Comportamento da média granulométrica no teste de alimentação: 1º cenário, degrau 92 t/h para 80 t/h

É possível observar que ocorreu decaimento do valor médio de granulometria. No momento da aplicação do degrau o valor médio era de 13,44 mm. Após cerca de 40 minutos do degrau, o valor médio estabilizou em torno de 11,36 mm.

Na Figura 9 é mostrado o gráfico em relação ao percentual retido em 12,5 mm após o degrau.

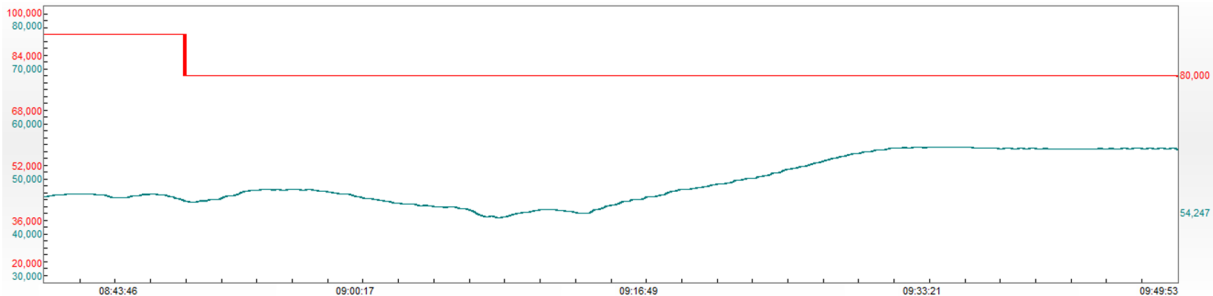


Figura 9: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de alimentação: 1º cenário, degrau 92 t/h para 80 t/h

Contrário à média granulométrica, o percentual de pelotas retidas em 12,5 mm aumentou. No momento do degrau o percentual era de 44,97%. Após cerca de 40 minutos, o valor médio do percentual era de aproximadamente 54,24%.

Na Figura 10 é mostrado o gráfico em relação ao percentual retido em 10 mm após o degrau.

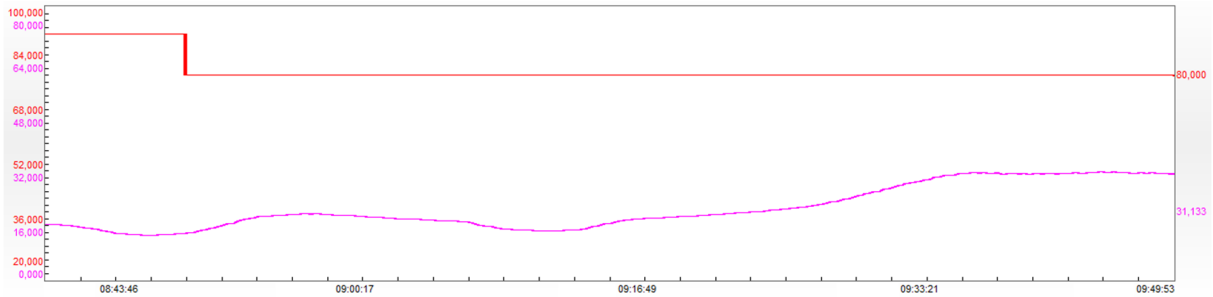


Figura 10: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de alimentação: 1º cenário, degrau 92 t/h para 80 t/h

Da mesma forma que a faixa retida em 12,5 mm, ocorreu aumento do percentual da faixa de pelotas retidas em 10 mm. No momento do degrau o percentual era de 13,62%, após 40 minutos o valor estabilizou em aproximadamente 31,31%.

Na Figura 11 é mostrado o gráfico em relação à taxa de retorno após o degrau.

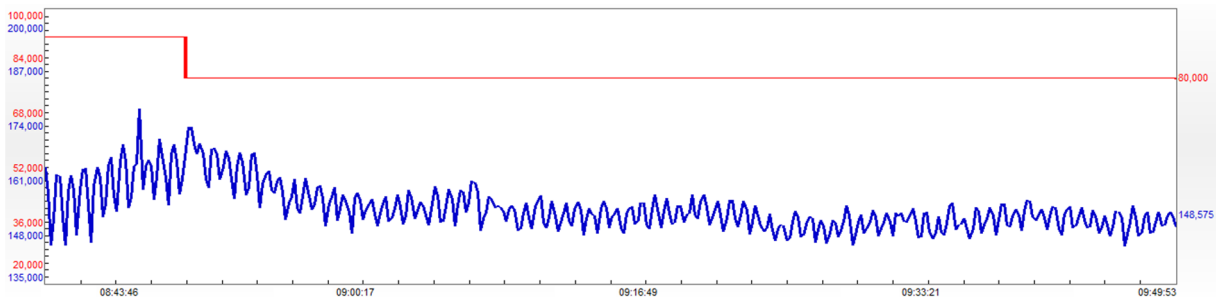


Figura 11: Comportamento da taxa de retorno no teste de alimentação: 1º cenário, degrau 92 t/h para 80 t/h

É observado que a amplitude da taxa de retorno diminuiu. No momento do degrau o valor da taxa de retorno era de 159,65 t/h. Após 40 minutos o valor médio ficou em aproximadamente 150,03 t/h.

b) Segundo cenário

Neste cenário, o material tem as características descritas na Tabela 2.

Tabela 2: Características do minério no segundo cenário

Horário	Superfície específica (cm ² /g)	Umidade <i>filter cake</i> (%)	SiO ₂ (%)
04:00	1470		
05:00		11	3,4
06:00			
07:00		10,9	3,41
08:00	1520		
09:00		10,64	3,68
10:00	1400		
11:00		10,99	3,74
12:00			

Para o teste não houve a adição de água e foram fixadas as seguintes variáveis:

- Frequência de rotação do tambor em 60 Hz;
- Dosagem de aglomerante (bentonita) em 0,54%.

Foi aplicado um degrau na alimentação da linha de pelotamento, de 93 t/h para 80 t/h.

Ocorreram variações na aplicação do segundo teste de alimentação, no entanto, não foram variações tão significativas quanto o primeiro teste de alimentação.

Na Figura 12 é apresentado o comportamento da média granulométrica mediante a variação do degrau de alimentação.

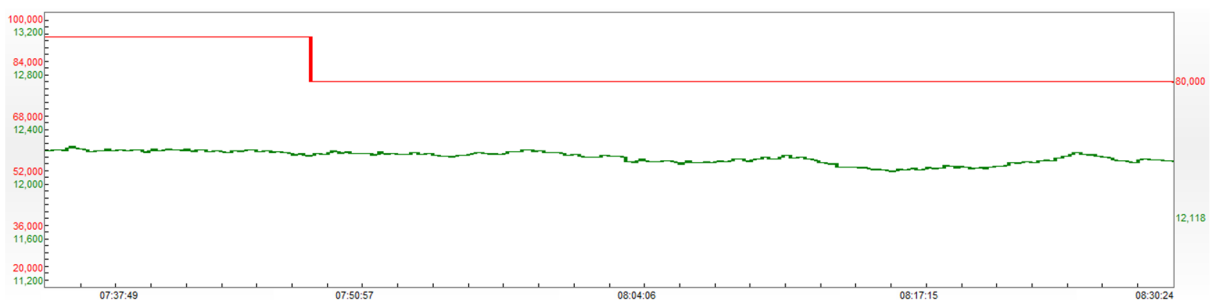


Figura 12: Comportamento da média granulométrica no teste de alimentação: 2º cenário, degrau 93 t/h para 80 t/h

Antes da aplicação do degrau o valor médio da granulometria estava em aproximadamente 12,19 mm. No momento da aplicação do degrau o valor era de 12,15 mm.

Como não ocorreu um decaimento perceptível no instante do degrau foi calculada a média de 10 a 20 minutos após o degrau, o valor obtido foi de 12,14 mm.

Na Figura 13 é mostrado o comportamento da faixa de 12,5 mm em relação ao degrau.

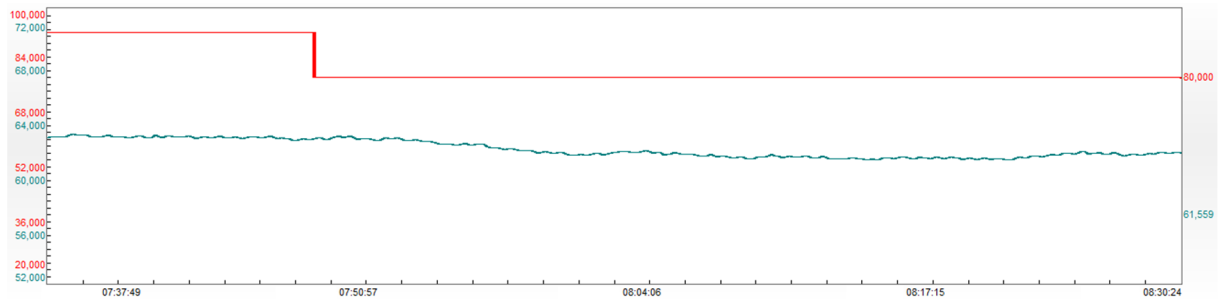


Figura 13: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de alimentação: 2º cenário, degrau 93 t/h para 80 t/h

Foi notado um decaimento do percentual de pelotas retidas em 12,5 mm. Anteriormente ao degrau, o valor médio do percentual era de aproximadamente 62,63%. No momento do degrau o valor era de 62,48%. Após o degrau, quando estabilizado o percentual ficou em aproximadamente 61,14%.

Na Figura 14 é mostrado o comportamento da faixa de 10 mm em relação ao degrau.

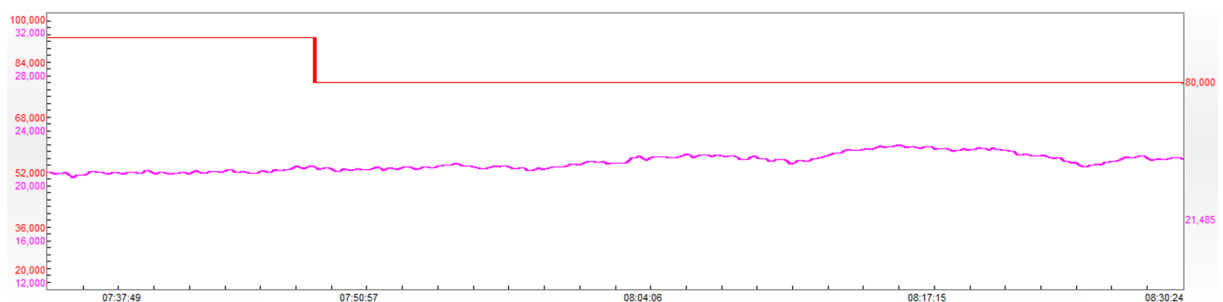


Figura 14: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de alimentação: 2º cenário, degrau 93 t/h para 80 t/h

É observado que ocorreu incremento do percentual de pelotas retidas em 10 mm. Anteriormente ao degrau o valor médio era de aproximadamente 20,5%. No momento do degrau o valor era 20,94%, e após estabilizada a faixa o percentual ficou em 22,23%.

Na Figura 15 é mostrado o comportamento da taxa de retorno em relação ao degrau.

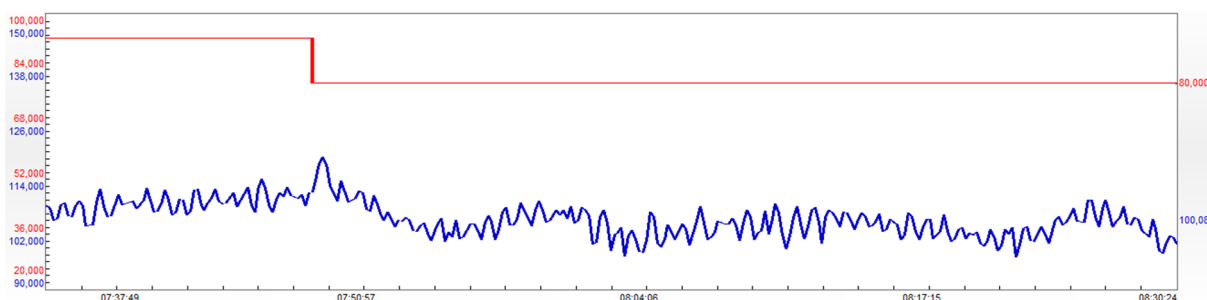


Figura 15: Comportamento da taxa de retorno no teste de alimentação: 2º cenário, degrau 93 t/h para 80 t/h

É observado que primeiramente a taxa de retorno possui um decaimento e a amplitude é diminuída. Anteriormente ao degrau o valor médio era de aproximadamente 109,11 t/h. No momento do degrau o valor era 110,95 t/h, e posteriormente ficou com valor médio aproximado de 104,13 t/h.

4.3.2 Variação da rotação do tambor

Igualmente, foram considerados dois cenários, com materiais com diferentes características em relação à superfície específica, umidade e teor de sílica.

a) Primeiro cenário

Este cenário também considera o material com as características descritas na Tabela 1, descrita na Seção 4.3.1-a).

Para o teste não houve a adição de água e foram fixadas as seguintes variáveis:

- Alimentação da linha em 80 t/h;
- Dosagem de aglomerante (bentonita) em 0,62%.

Foram aplicados 4 degraus:

- 60 Hz para 58 Hz;
- 58 Hz para 56 Hz;
- 56 Hz para 58 Hz;
- 58 Hz para 60 Hz.

Na Figura 16 é mostrado o gráfico contendo os degraus aplicados e o comportamento obtido da média granulométrica.

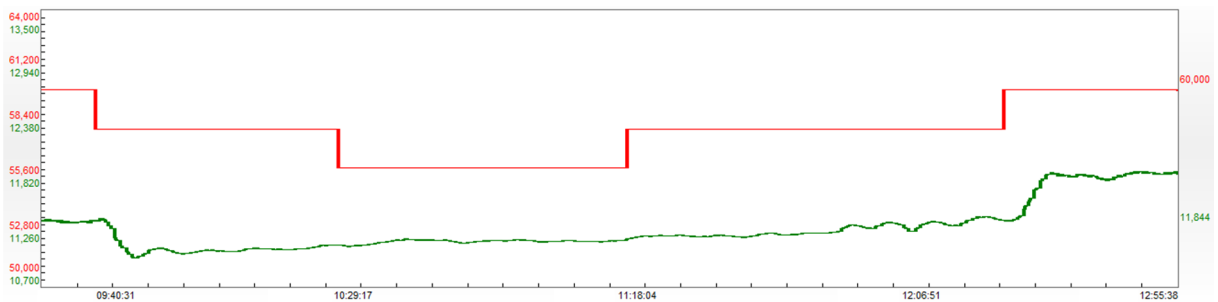


Figura 16: Comportamento da granulometria média no teste de rotação: 1º cenário

É observado que mediante a aplicação dos degraus a granulometria média variou. Antes do primeiro degrau o valor médio era de aproximadamente 11,36 mm, após este teve considerável diminuição, posteriormente passando a aumentar. Ao fim dos testes o valor médio estabilizou em aproximadamente 11,84 mm.

Na Figura 17 é mostrado o gráfico contendo os degraus aplicados e o comportamento obtido na faixa de pelotas retidas em 12,5 mm.

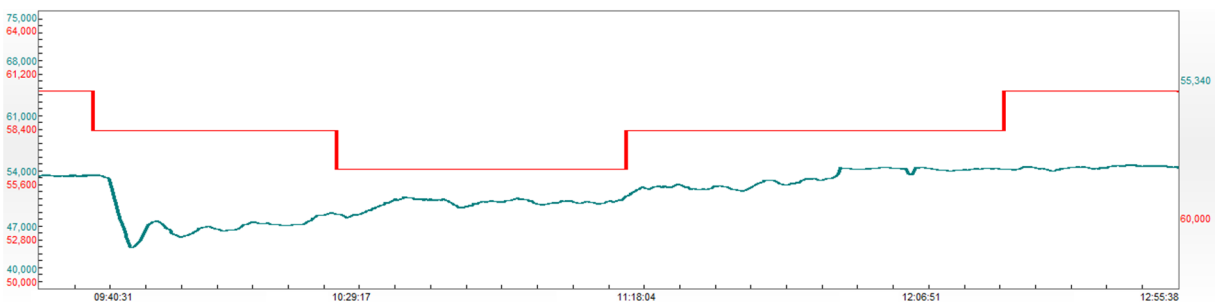


Figura 17: Comportamento do percentual retido em 12,5 mm no teste de rotação: 1º cenário

A variação obtida em relação a faixa de pelotas retidas em 12,5 mm é semelhante ao comportamento da média granulométrica.

Antes da aplicação do degrau o percentual médio era de aproximadamente 54,23%. Após a aplicação dos testes o percentual estabilizou em torno de 55,45%.

Na Figura 18 é mostrado o gráfico contendo os degraus aplicados e o comportamento obtido na faixa de pelotas retidas em 10 mm.

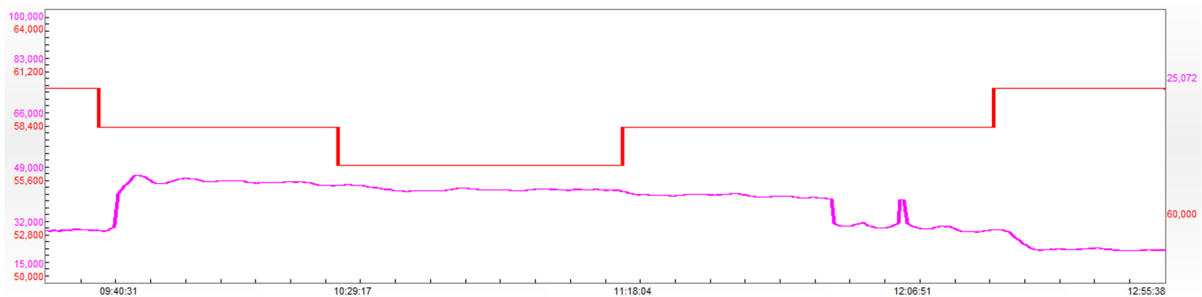


Figura 18: Comportamento do percentual retido em 10 mm no teste de rotação: 1º cenário

É notado um comportamento oposto tanto ao da média granulométrica, quanto ao da faixa retida em 12,5 mm.

Quando aplicado o primeiro degrau o percentual médio da faixa retida em 10 mm era de aproximadamente 31,3%. Ao fim dos testes estabilizou em aproximadamente 25,08%.

Na Figura 19 é mostrado o gráfico contendo os degraus aplicados e o comportamento comparativo entre as faixas de pelotas retidas em 10mm e 12,5mm.

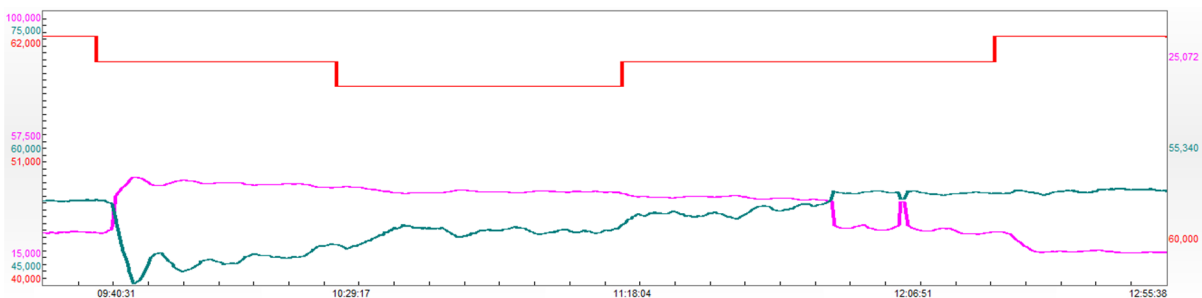


Figura 19: Comparação entre as faixas retidas de 10mm e 12,5mm: 1º cenário

É observado que as faixas possuem comportamento totalmente oposto. O que indica que objetivando o aumento da granulometria, a faixa de 12,5 mm será incrementada. Já se tratando da diminuição da granulometria a faixa de 10 mm terá maior percentual acrescido.

Na Figura 20 é mostrado o gráfico contendo os degraus aplicados e o comportamento obtido na taxa de retorno.

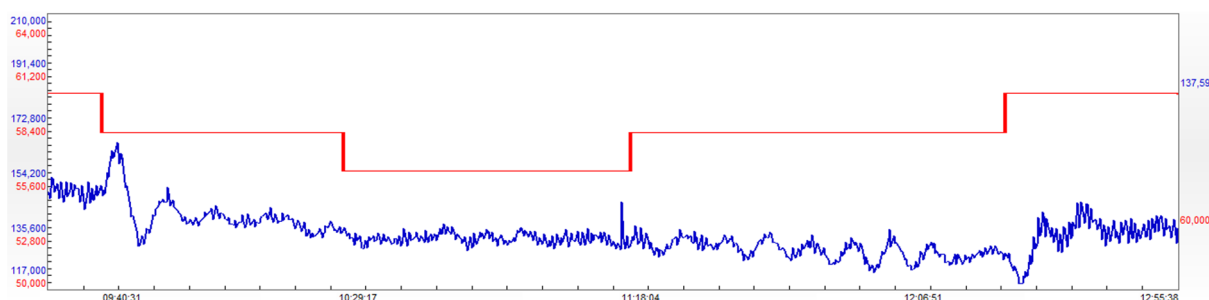


Figura 20: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 1º cenário

Nota-se que ocorreram variações em relação as aplicações dos degraus, sendo que a taxa de retorno decresceu quando diminuída a velocidade de rotação, ou seja, possui relação com a velocidade de rotação do tambor. Antes da aplicação do primeiro degrau a média estava em aproximadamente 149,98 t/h. Após os testes o valor ficou em aproximadamente 137,17 t/h.

Nas Figuras 12, 13, 14, 15 e 16 é observado que ocorreram variações mediante a aplicação dos degraus. No entanto, no segundo e terceiro degraus as variações foram menores.

A seguir, são detalhados os degraus.

a.1) Degrau 60 Hz para 58 Hz

A Figura 21 mostra o detalhe do primeiro degrau em relação à média da granulometria.

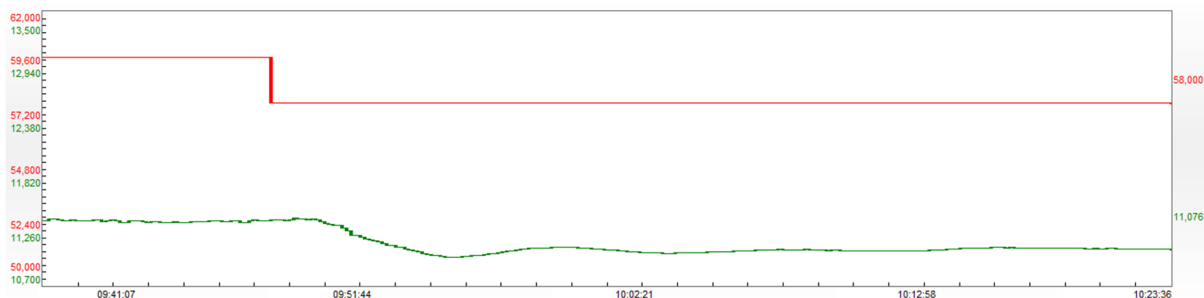


Figura 21: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz

O gráfico mostra um intervalo de 40 minutos. A média inicialmente estava em 11,36 mm, e é observado que ocorreu a diminuição da média granulométrica com a aplicação do degrau. Após o tempo aproximado de 30 minutos ocorre a estabilização da granulometria que fica em aproximadamente 11,08 mm.

A Figura 22 mostra o detalhe em relação a faixa retida em 12,5 mm

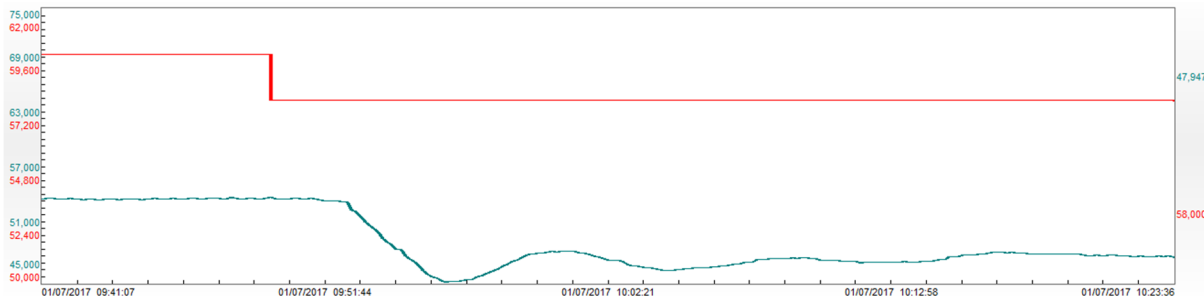


Figura 22: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz

Em relação a faixa de pelotas retidas em 12,5 mm também ocorreu a diminuição do percentual quando aplicado o degrau. Antes da aplicação do degrau a faixa estava com percentual de aproximadamente 54,23%, quando aplicado o degrau chegou ao valor mínimo de 45,15% e passou a oscilar e a aumentar gradualmente. Aparentemente o percentual estabilizou em aproximadamente 48%, mas após 25 minutos, o percentual voltou a subir.

Na Figura 23 é mostrado o comportamento em relação a faixa de pelotas retidas em 10 mm.

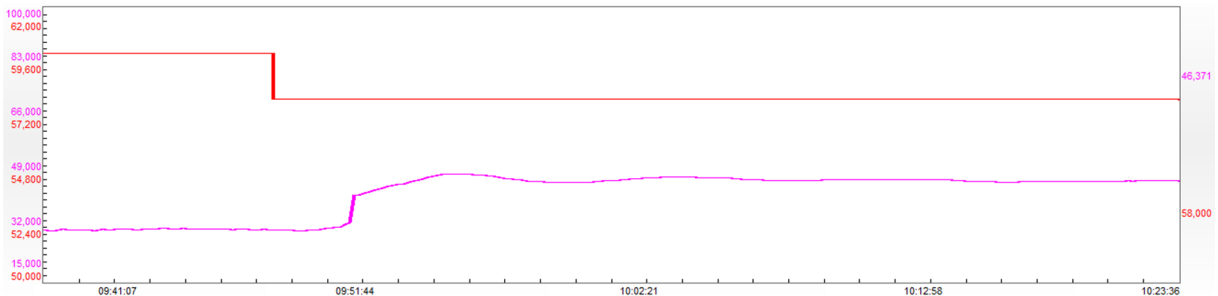


Figura 23: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz

É observado que com aplicação do degrau o percentual de pelotas retidas em 10 mm aumentou, comportamento este oposto à média granulométrica e ao percentual de faixas retidas em 12,5 mm. Antes da aplicação do degrau o percentual retido estava em aproximadamente 31,3%, após o degrau chegou ao valor máximo de 48,5% e estabilizou em aproximadamente 46,3%.

Na Figura 24 é mostrado o comportamento da taxa de retorno em relação ao degrau.

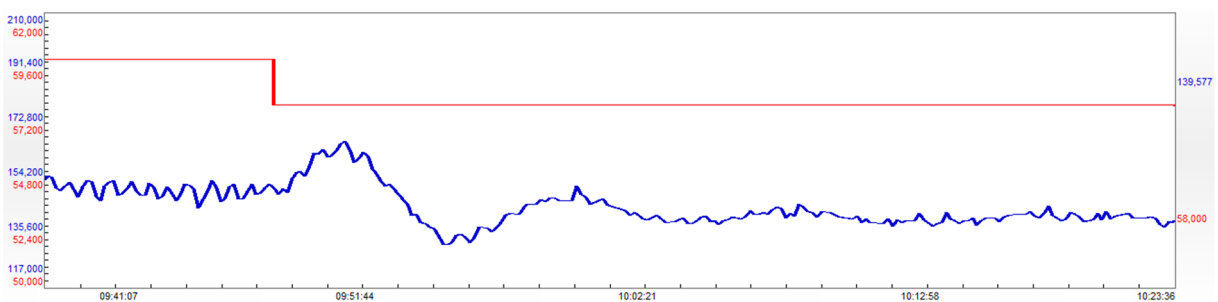


Figura 24: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz

A taxa de retorno, antes da aplicação do degrau, estava com valor aproximado de 149,98 t/h. Quando aplicado o degrau, a taxa de retorno primeiramente aumenta, e após 2 minutos e 40

segundos atinge o valor pico de 166 t/h. Após atingir o valor pico a taxa de retorno diminui e fica estável em um valor abaixo do valor anterior ao degrau, em aproximadamente 139,89 t/h.

a.2) Degrau 58 Hz para 56 Hz

A Figura 25 mostra o detalhe do segundo degrau em relação à média da granulometria.

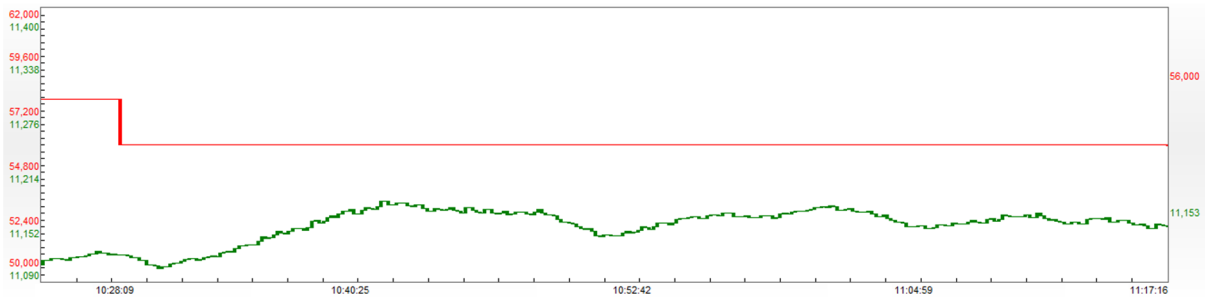


Figura 25: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz

Foi observado um pequeno aumento na média da granulometria, ficando com valor médio de 11,15 mm. Porém, devido haver diferentes variáveis que podem influenciar no aumento da granulometria, não é possível afirmar que a aplicação do degrau influenciou o aumento.

Na Figura 26 é mostrado o comportamento da faixa de 12,5 mm em relação ao degrau.

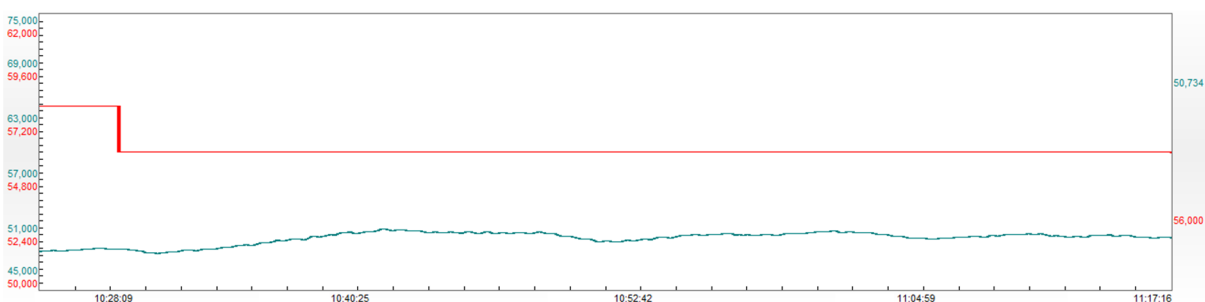


Figura 26: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz

Da mesma forma que o comportamento da média granulométrica, a faixa de 12,5 mm também apresentou aumento, chegando ao valor máximo de 51,59% após o degrau e ficando com percentual médio de 50,92% no intervalo após o valor máximo.

Na Figura 27 é apresentado o comportamento da faixa de 10 mm em relação ao degrau.

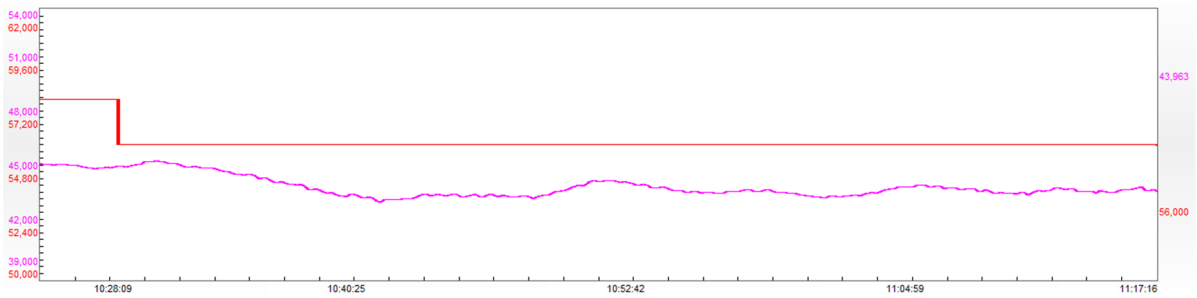


Figura 27: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz

É observado que ocorreu uma pequena diminuição do percentual de pelotas retidas em 10 mm. No momento do degrau o valor era de 45,28%, chegando ao valor mínimo de 43,32% e estabilizando com média aproximada de 43,89%.

Na Figura 28 é apresentado o comportamento da taxa de retorno em relação a aplicação do degrau.

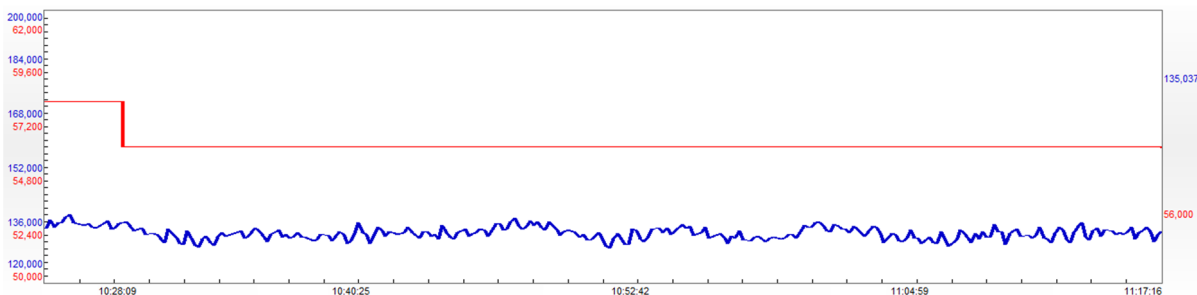


Figura 28: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz

Não foi observada mudança significativa na taxa de retorno tendo valor médio em aproximadamente 134,23 t/h durante o período.

a.3) Degrau 56 Hz para 58 Hz

Na Figura 29 é apresentado o comportamento da média granulométrica quando aplicado o degrau de 56 Hz para 58 Hz.

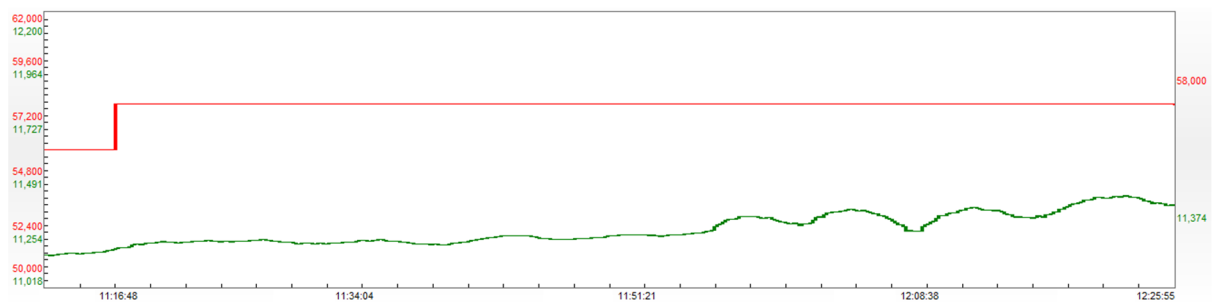


Figura 29: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz

Observando a Figura 29 é visto que, transcorrido aproximadamente 40 minutos, ocorre uma variação no valor médio da granulometria tendendo a aumentar. Como a variação ocorreu muito após a aplicação do degrau, é provável que algum distúrbio no processo tem ocorrido.

Na Figura 30 é apresentado o comportamento da faixa de 12,5 mm em relação ao degrau.

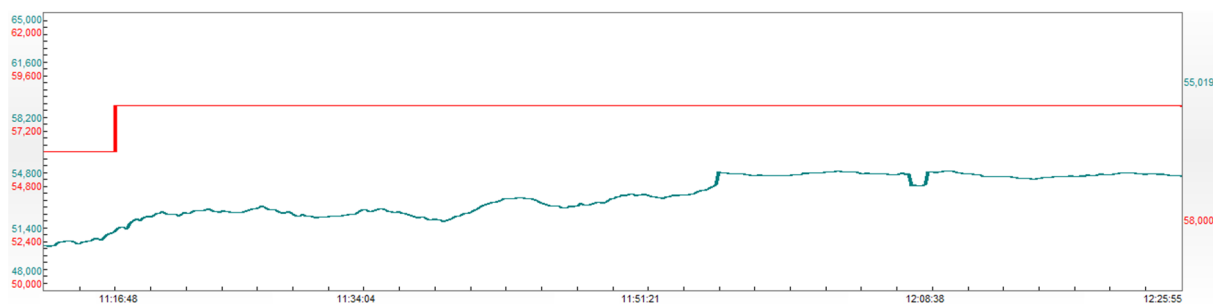


Figura 30: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz

Da mesma forma que a média granulométrica, é notada variação no mesmo intervalo.

Na Figura 31 é apresentado o comportamento da faixa de pelotas retidas em 10 mm.

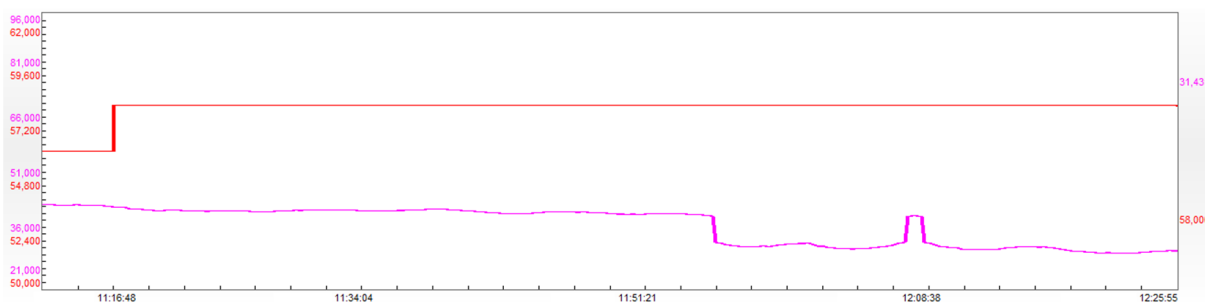


Figura 31: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz

Também é notada variação no intervalo da mesma forma que a média e a faixa retida em 12,5 mm, porém no sentido inverso, ou seja, é observada diminuição do percentual retido em 10 mm.

Na Figura 32 é apresentado o comportamento da taxa de retorno.

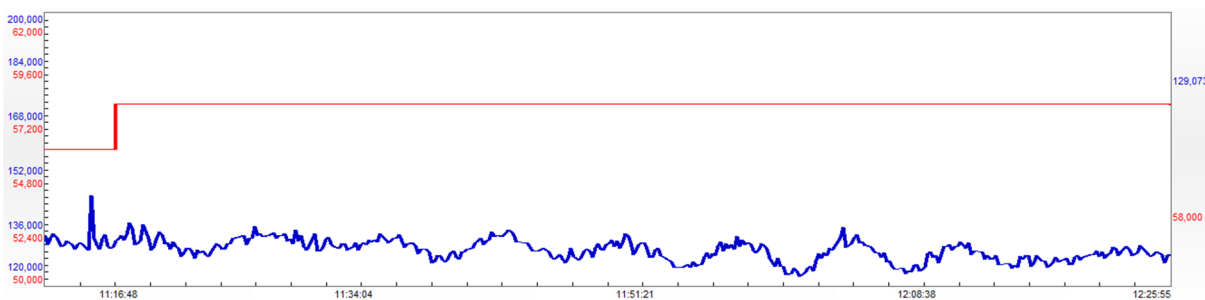


Figura 32: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz

A taxa de retorno não apresentou mudança significativa com a aplicação do degrau.

a.4) Degrau 58 Hz para 60 Hz

Na Figura 33 é apresentada a resposta relacionada à média granulométrica para a aplicação do degrau de 58 Hz para 60 Hz.

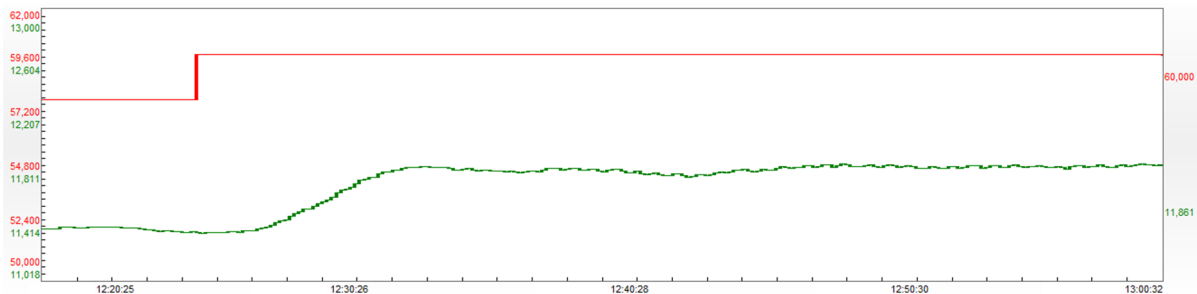


Figura 33: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz

A aplicação do degrau de 58 Hz para 60 Hz gerou um aumento no valor da granulometria média. No momento do degrau o valor da granulometria estava em 11,36 mm e, após aproximadamente 8 minutos, atingiu o valor pico de 11,853 mm. Quando estabilizada apresentou valor médio de aproximadamente 11,84 mm.

A Figura 34 mostra o comportamento obtido em relação a faixa de 12,5 mm.

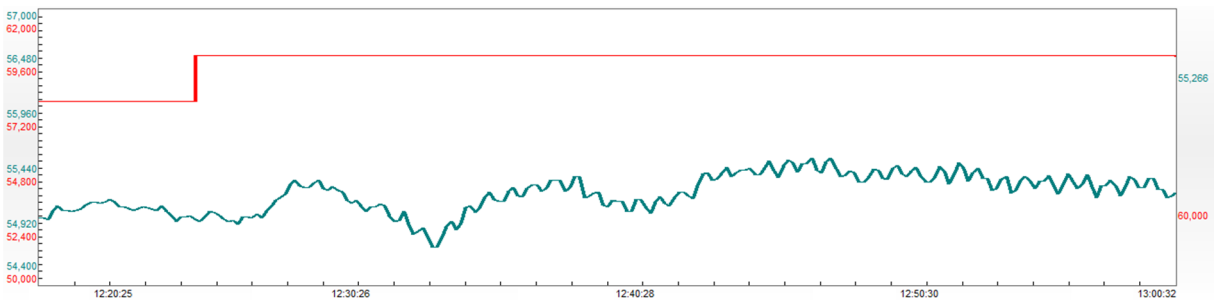


Figura 34: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz

É observado que também ocorreu o aumento na faixa de pelotas retidas. Porém não tão significativo quanto a média da granulometria.

Quando aplicado o degrau, o percentual de pelotas retidas estava em aproximadamente 55%. Decorridos 23 minutos, o valor pico atingiu 55,6% e estabilizou com valor médio de aproximadamente 55,42%.

Na Figura 35 é apresentado o comportamento obtido em relação a faixa de 10 mm.

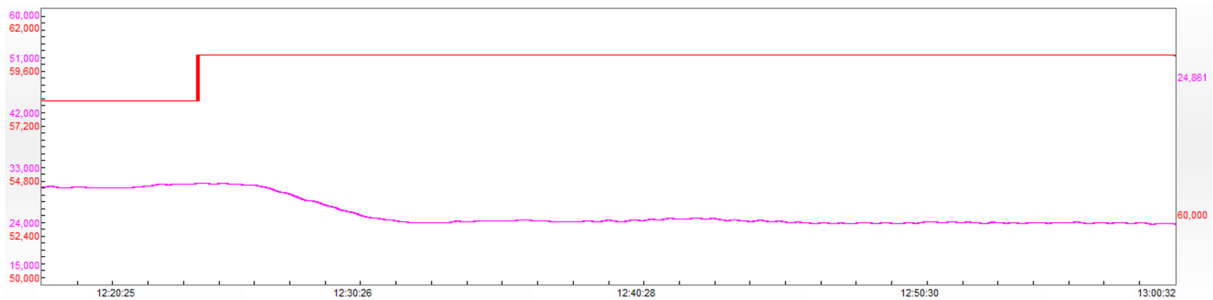


Figura 35: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz

No momento em que é aplicado o degrau o percentual retido em 10 mm era de 31,34%, e o comportamento é de diminuição do percentual ficando estável em aproximadamente 25,04%.

Na Figura 36 é apresentado o comportamento da taxa de retorno.

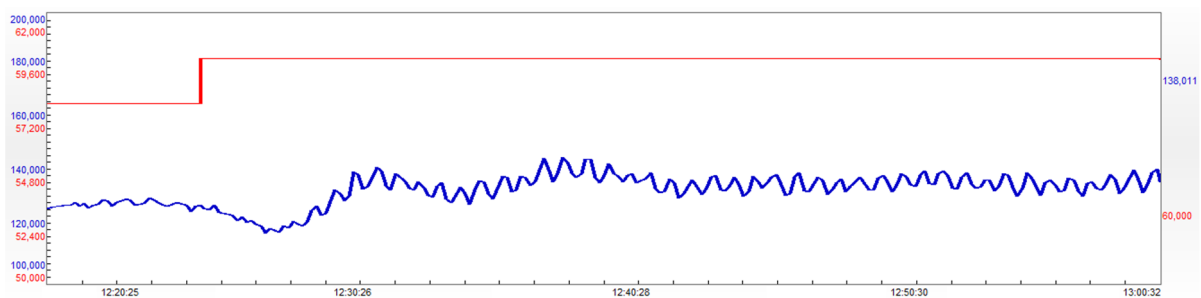


Figura 36: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 1º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz

É observado que primeiramente a taxa de retorno possui um decaimento e posteriormente aumenta.

No momento da aplicação do degrau o valor era de 129 t/h, após 2 minutos o valor decaiu para 118,85 t/h. Em seguida ao decaimento o comportamento muda, passando a aumentar atingindo o valor pico de 146,15 t/h 12 minutos após a aplicação do degrau. Decorridos 5 minutos após atingir o valor pico, a taxa de retorno apresenta estabilidade em torno de 137,85 t/h.

b) Segundo cenário

Neste cenário considera-se o material com as características descritas na Tabela 2, descrita na Seção 4.3.1-b).

Para o teste foram, inicialmente, fixadas as seguintes variáveis:

- Vazão de água em 5 l/min;
- Alimentação em 80 t/h;
- Dosagem de aglomerante (bentonita) em 0,54%.

Devido às necessidades de processo a vazão de água foi modificada após o segundo degrau, de 5 l/min para 9,5 l/min, 8,1 l/min e 6 l/min.

Da mesma forma que o primeiro teste de velocidade foram aplicados 4 degraus:

- 60 Hz para 58 Hz;
- 58 Hz para 56 Hz;
- 56 Hz para 58 Hz;
- 58 Hz para 60 Hz.

Foi adotada alimentação constante de 80t/h, porém foi necessário utilizar adição de água.

Na Figura 37 é mostrado o gráfico contendo os degraus aplicados e o comportamento obtido da média granulométrica.

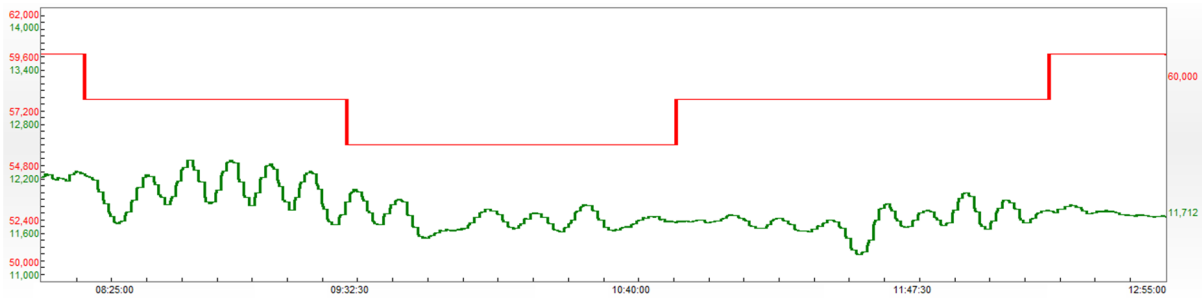


Figura 37: Comportamento da granulometria média no teste de rotação: 2º cenário

Quando aplicados os degraus o processo apresentou instabilidade, sendo necessário o aumento da adição de água para normalizar o processo.

Antes do primeiro degrau o valor da média estava em aproximadamente 12,15 mm. Após a realização dos testes o valor estabilizou em aproximadamente 11,71 mm.

Na Figura 38 é mostrado o gráfico contendo os degraus aplicados e o comportamento obtido na faixa de pelotas retidas em 12,5 mm.

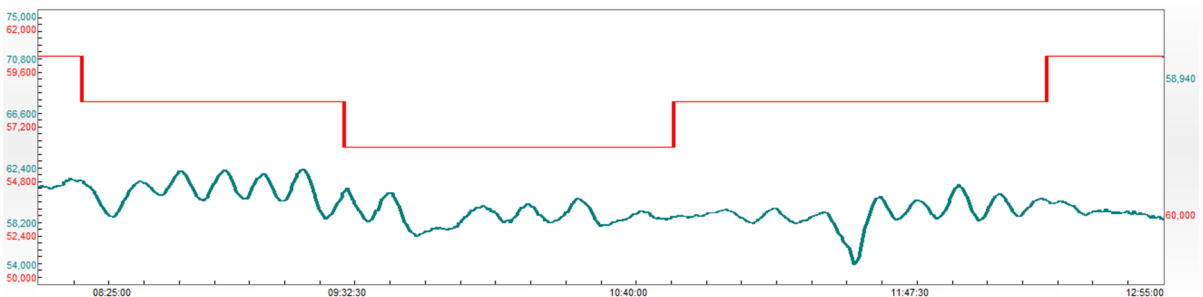


Figura 38: Comportamento do percentual retido em 12,5 mm no teste de rotação: 2º cenário

Da mesma forma que a média granulométrica, a faixa de pelotas retidas em 12,5 mm apresentou grande instabilidade quando aplicados os degraus.

Antes da aplicação do primeiro degrau o valor médio do percentual de pelotas retidas em 12,5 mm era de aproximadamente 61,64 %. Após os testes o valor médio ficou em aproximadamente 59,31%.

Na Figura 39 é mostrado o gráfico contendo os degraus aplicados e o comportamento obtido na faixa de pelotas retidas em 10 mm.

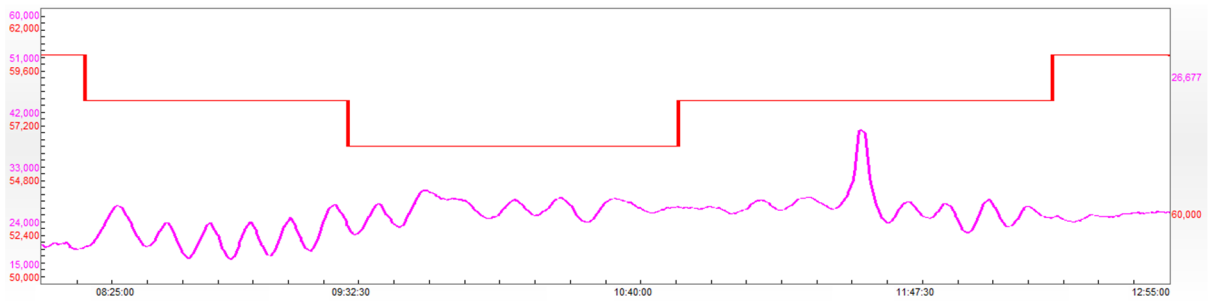


Figura 39: Comportamento do percentual em 10 mm no teste de rotação: 2º cenário

É observado que ocorreram variações e instabilidade mediante às aplicações dos degraus. É notado também que apresentou comportamento oposto a faixa de pelotas retidas em 12,5 mm.

Antes da aplicação do primeiro degrau o percentual médio das pelotas retidas em 10 mm era de aproximadamente 21,13%. Após os testes o percentual ficou em aproximadamente 26,57%.

Na Figura 40 é apresentado o gráfico de comparação das faixas de 12,5 mm e 10 mm.

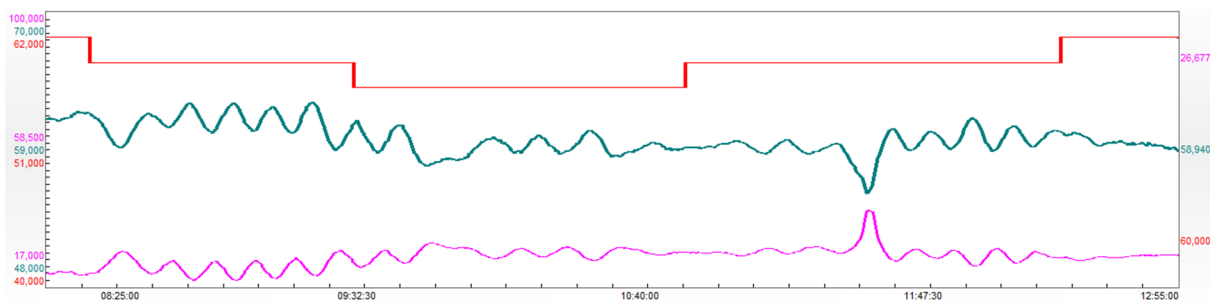


Figura 40: Comparação entre faixas retidas de 10mm e 12,5mm: 2º cenário

É notado pela Figura 40 que quando ocorre o aumento da faixa de 10 mm, ocorre a diminuição da faixa de 12,5 mm. Quando ocorre a diminuição da faixa de 10 mm, ocorre o aumento da faixa de 12,5 mm.

Na Figura 41 é mostrado o gráfico contendo os degraus aplicados e o comportamento obtido na taxa de retorno.

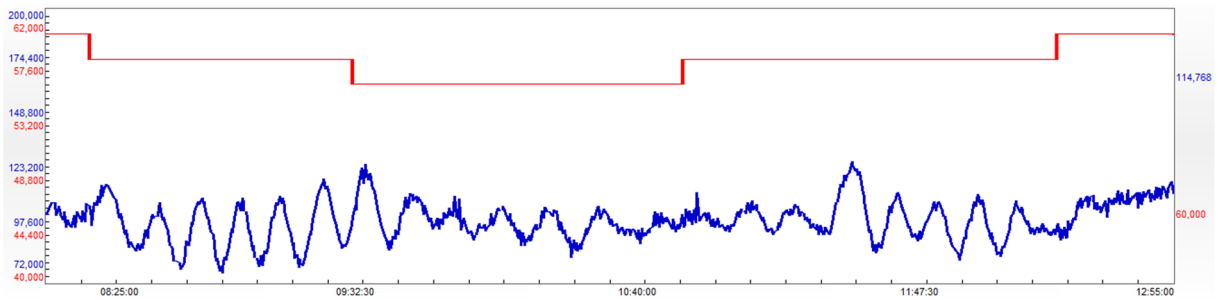


Figura 41: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 2º cenário

É observado que ocorreu grande instabilidade na aplicação dos degraus, principalmente no primeiro. Também é possível notar que na aplicação do primeiro degrau a taxa de retorno teve oscilações com grande amplitude, tendo valor mínimo de 76,86 t/h, e máximo de 127,36 t/h.

Antes da aplicação do primeiro degrau o valor médio da taxa de retorno estava em aproximadamente 103,42 t/h. Após os testes o valor médio ficou em aproximadamente 113,08 t/h.

Na Figura 42 é apresentado o momento da mudança de adição de água.

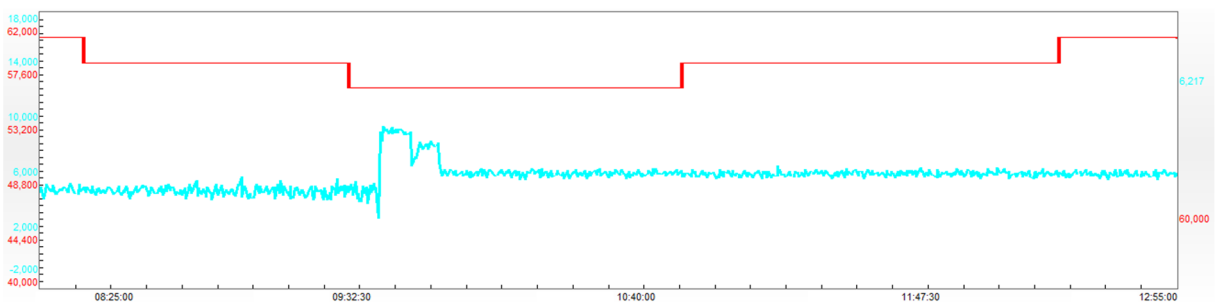


Figura 42: Influência da vazão de água no teste de rotação: 2º cenário

Antes da mudança na vazão de água, o valor médio estava em aproximadamente 5,02 l/min. Com o aumento da vazão o valor chegou a 9,5 l/min e posteriormente foi diminuído ficando em aproximadamente 6,32 l/min.

A seguir são detalhados os testes com relação à variação da rotação.

b.1) Degrau 60 Hz para 58 Hz

A Figura 43 mostra o detalhe do primeiro degrau em relação à média da granulometria.

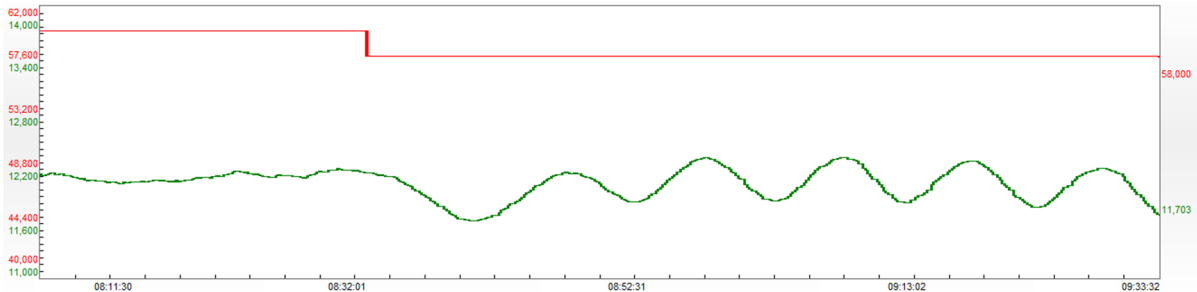


Figura 43: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz

Antes da aplicação do degrau a média apresentava estabilidade em aproximadamente 12,15 mm. Quando aplicado o degrau a granulometria apresentou grande oscilação, chegando ao valor mínimo de 11,63 mm, e máximo de 12,33 mm.

A Figura 44 mostra o detalhe em relação a faixa retida em 12,5 mm.

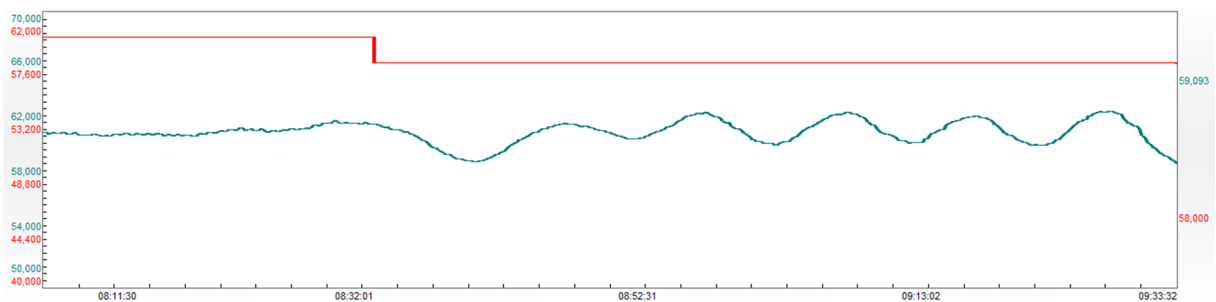


Figura 44: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz

Assim como a média granulométrica, a faixa retida em 12,5 mm apresentou grande oscilação.

O valor médio antes da aplicação do degrau era de 61,64%. Com as oscilações o valor mínimo obtido foi 59,14% e máximo de 62,81%.

A Figura 45 mostra o detalhe em relação a faixa retida em 10 mm.

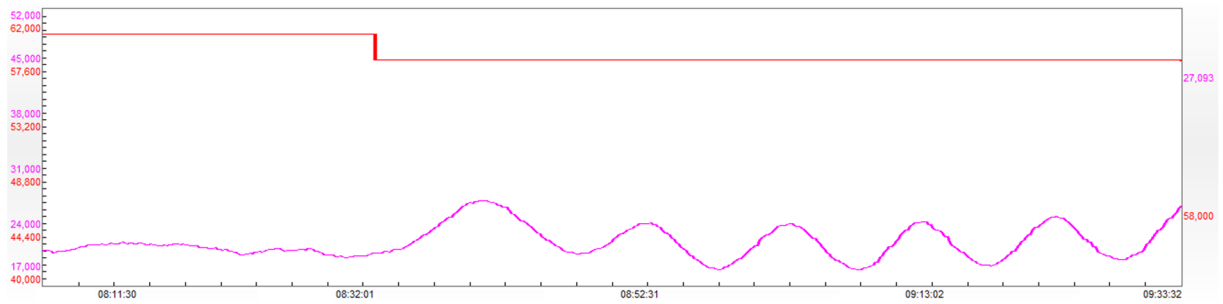


Figura 45: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz

A faixa de pelotas retidas em 10 mm também apresentou grande oscilação com a aplicação do degrau.

O valor antes do degrau era de aproximadamente 21,13%. Com a aplicação do degrau o valor mínimo obtido foi de 18,92% e máximo de 27,95%.

Na Figura 46 é mostrado o comportamento da taxa de retorno em relação ao degrau.



Figura 46: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 60 Hz para 58 Hz

Quando aplicado o degrau a taxa de retorno apresentou oscilação, e a cada variação o valor pico aumentou.

Antes da aplicação do degrau o valor médio era de 103,42 t/h. Após a aplicação do degrau o valor mínimo obtido foi de 76,86 t/h, e máximo de 120,49 t/h.

b.2) Degrau 58 Hz para 56 Hz

A Figura 47 mostra o detalhe do segundo degrau em relação à média da granulometria.

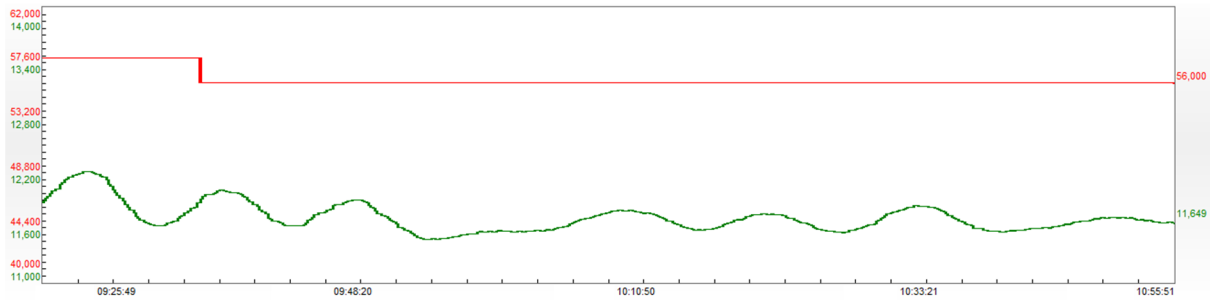


Figura 47: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz

Amplitude de variação diminuiu após o degrau, porém foi aumentada a vazão de água no processo, o que certamente contribuiu para diminuição da variabilidade da média granulométrica. No momento do degrau o valor era de 11,87 mm.

Na Figura 48 é mostrado o comportamento da faixa de 12,5 mm em relação ao degrau.

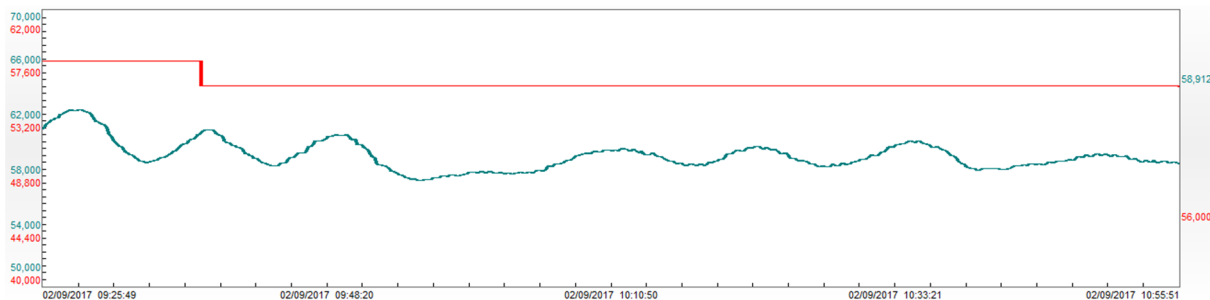


Figura 48: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz

É observada diminuição da variação da faixa retida em 12,5 mm com melhor uniformidade. No momento do degrau o percentual era de 60,99%.

Na Figura 49 é mostrado o comportamento da faixa de 10 mm em relação ao degrau.

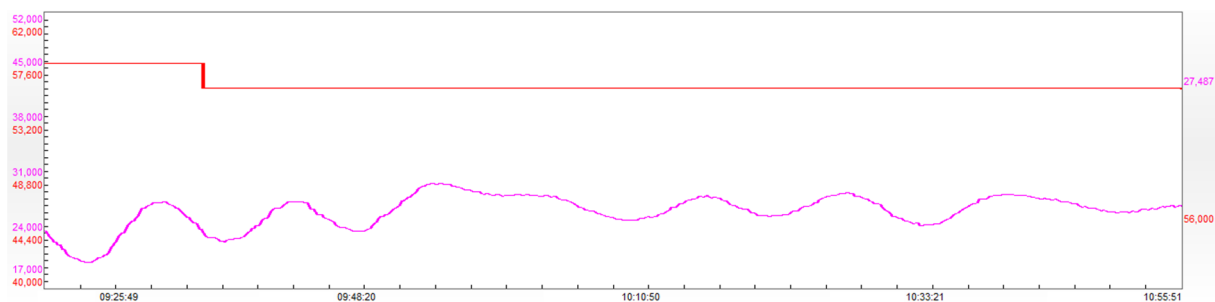


Figura 49: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz

É observada menor variação na faixa de 10 mm, provavelmente em função da adição de água. No momento do degrau o percentual era de 24,51%.

Na Figura 50 é apresentado o comportamento da taxa de retorno em relação a aplicação do degrau.

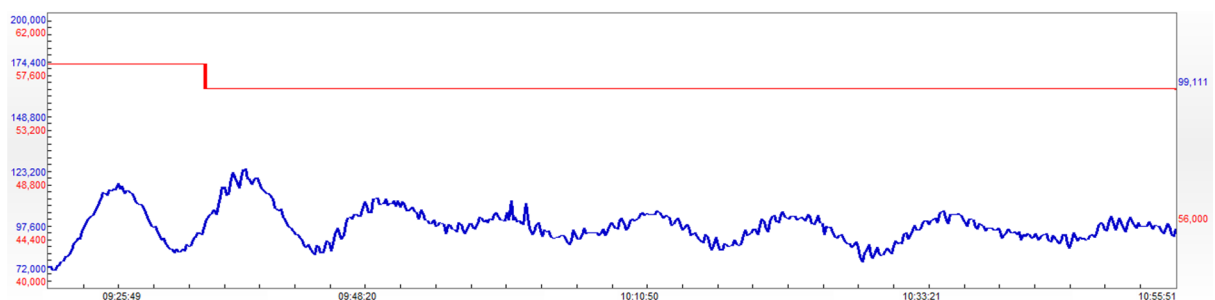


Figura 50: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 56 Hz

Devido à grande oscilação e o constante aumento da taxa de retorno, foi aumentada a vazão de água o que diminuiu a oscilação da variável. No momento do degrau a taxa de retorno era de 96,78 t/h.

b.3) Degrau 56 Hz para 58 Hz

Na Figura 51 é apresentado o comportamento da média granulométrica quando aplicado o degrau de 56 Hz para 58 Hz.

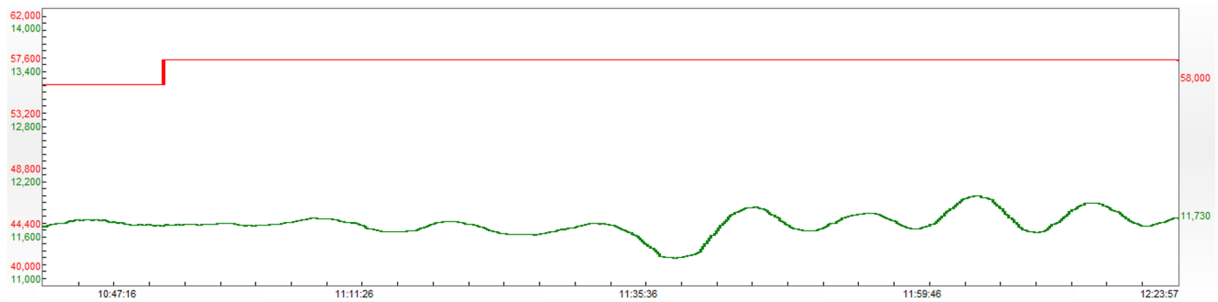


Figura 51: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz

Após a aplicação do degrau, a média granulométrica apresentou aumento e nova oscilação.

No momento do degrau o valor era de 11,63 mm. Após o degrau a variável apresentou oscilação chegando ao valor mínimo de 11,29 mm e máximo de 11,97 mm.

Na Figura 52 é apresentado o comportamento da faixa de 12,5 mm em relação ao degrau.

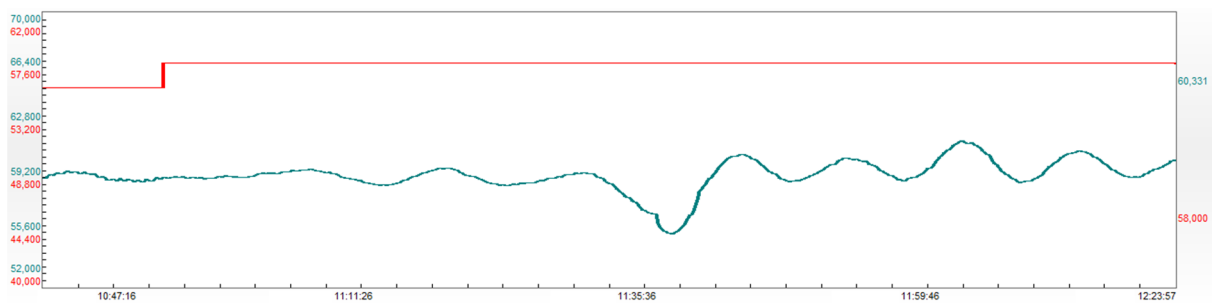


Figura 52: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz

Da mesma forma que a média granulométrica a faixa retida em 12,5 mm apresentou aumento e nova oscilação.

No momento do degrau o valor era de 59,06%. Após o degrau o valor mínimo obtido foi de 55,46% e máximo de 61,6%.

Na Figura 53 é apresentado o comportamento da faixa de 10 mm em relação ao degrau.

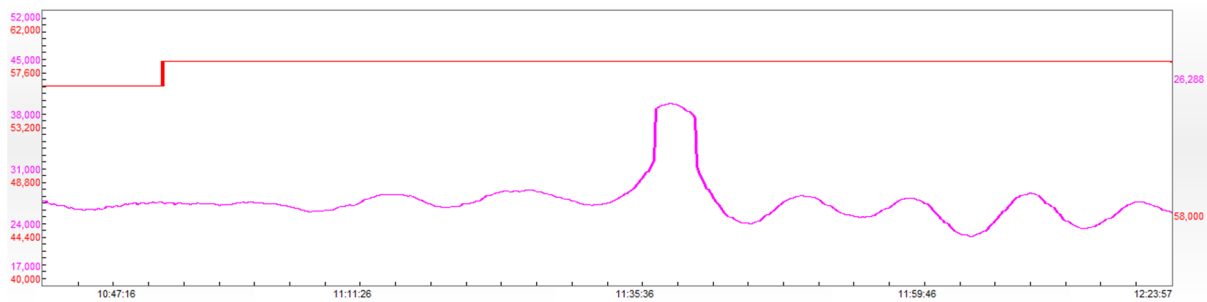


Figura 53: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz

No momento do degrau o percentual era de 27,65%. O valor mínimo obtido foi de 23,23%, e máximo de 40,19%.

Na Figura 54 é apresentado o comportamento da taxa de retorno.

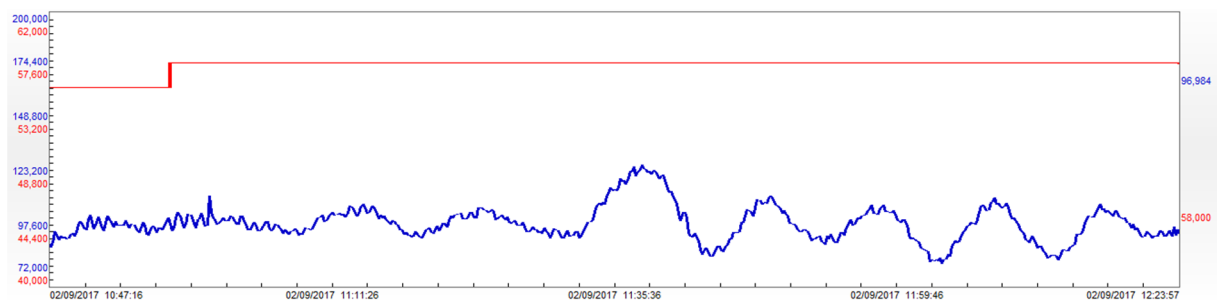


Figura 54: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 56 Hz para 58 Hz

A taxa de retorno apresentou maiores oscilações com maior amplitude.

No momento do degrau o valor era de 104,16 t/h. Após o degrau o valor mínimo foi de 82,81 t/h, e máximo de 128,57 t/h.

b.4) Degrau 58 Hz para 60 Hz

Na Figura 55 é apresentada a resposta relacionada à média granulométrica para a aplicação do degrau de 58 Hz para 60 Hz.

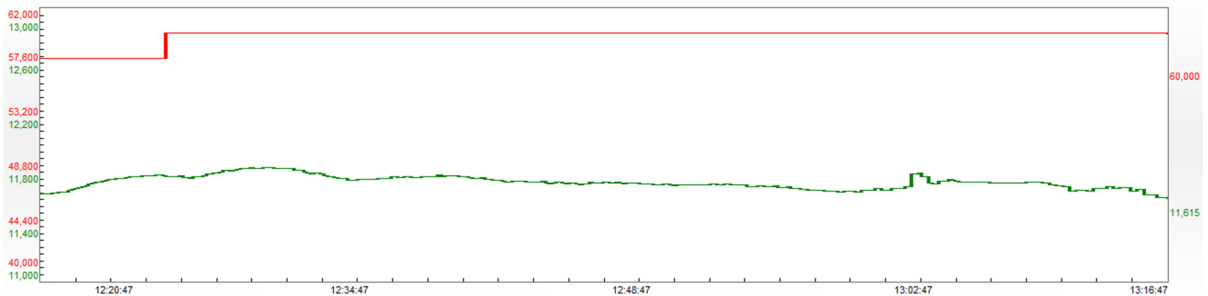


Figura 55: Comportamento da média granulométrica no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz

Após o degrau as oscilações identificadas anteriormente foram reduzidas.

No momento do degrau o valor era de 11,77 mm. Após o degrau o valor estabilizou em aproximadamente 11,71 mm.

A Figura 56 mostra o comportamento obtido em relação a faixa de 12,5 mm.

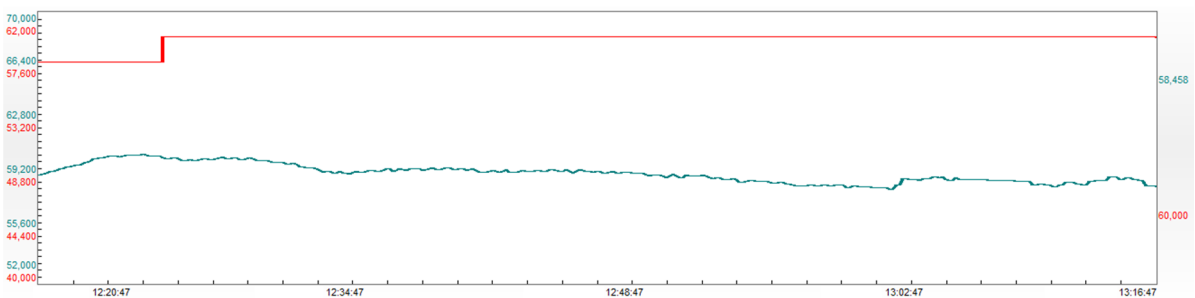


Figura 56: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz

Da mesma forma que a média granulométrica, as oscilações foram reduzidas.

No momento do degrau o percentual era de 60,43% de pelotas retidas em 12,5 mm. Após o degrau o valor estabilizou em aproximadamente 59,31%.

A Figura 57 mostra o comportamento obtido em relação a faixa de 10 mm.

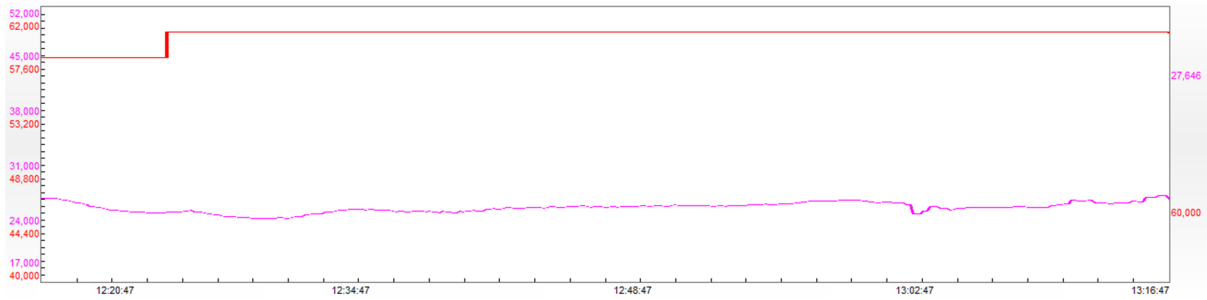


Figura 57: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz

É observado que após o degrau a variável apresentou estabilidade.

No momento do degrau o percentual era de 25,77% de pelotas retidas em 10 mm. Após o degrau o valor estabilizou em aproximadamente 26,57%.

Na Figura 58 é apresentado o comportamento da taxa de retorno.

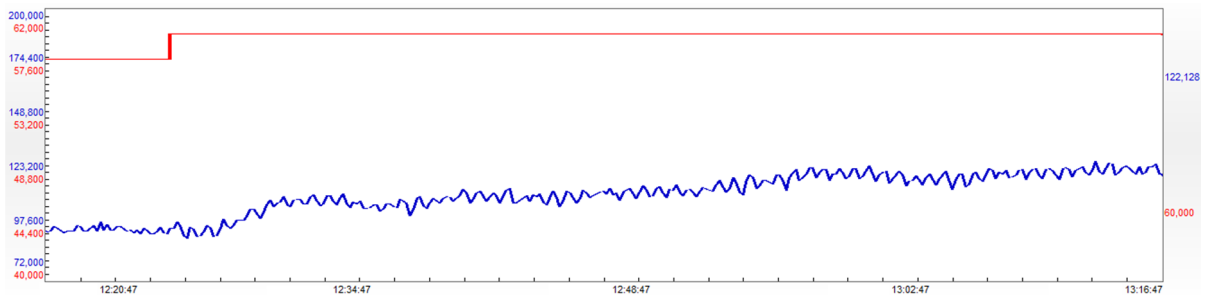


Figura 58: Comportamento da taxa de retorno no teste de rotação: 2º cenário, degrau de 58 Hz para 60 Hz

As oscilações com grandes amplitudes foram reduzidas, porém o valor estabilizado de retorno aumentou.

No momento do degrau o valor de retorno era de 94,09 t/h. Após o degrau a taxa de retorno aumentou e estabilizou em aproximadamente 113,08 t/h.

4.3.3 Variação da vazão de água

Para a realização dos testes envolvendo a variação da vazão de água, primeiramente é necessário obter o controle da vazão. Para analisar a quantidade de água que é adicionada ao processo, foi instalado um medidor de vazão com faixa de 0 a 20 litros/minuto. Posteriormente, foi instalada uma válvula controladora.

Com os elementos de medição e controle instalados, foi proposto um controlador PI (Proporcional e Integral) para o controle de vazão.

Como a malha de vazão geralmente é uma malha mais rápida, não há necessidade da derivada, pois o próprio sistema pode corrigir o seu valor, não existindo necessidade de antecipar o erro.

Após as instalações foram efetuados testes de resposta ao degrau relacionando a abertura da válvula com a vazão obtida.

O teste consistiu em aplicar uma variação de abertura na válvula, ou seja, a aplicação de um degrau, primeiramente de 15% para 25%, em seguida de 25% para 5%, e finalizando com a variação de 5% para 15%.

Na Figura 59 é mostrado o gráfico com a sequência de degraus aplicados.

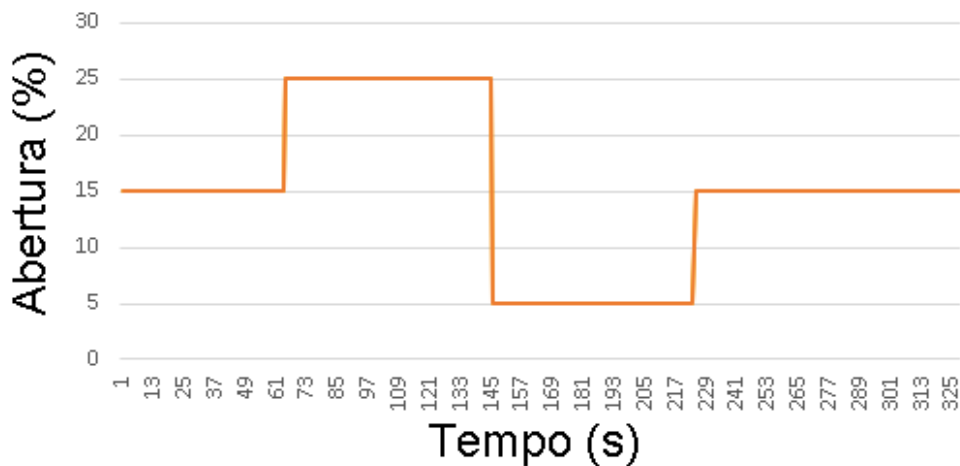


Figura 59: Influência do degrau na abertura da válvula

Na Figura 60 é mostrada a resposta da vazão mediante a aplicação dos degraus apresentados na Figura 59.

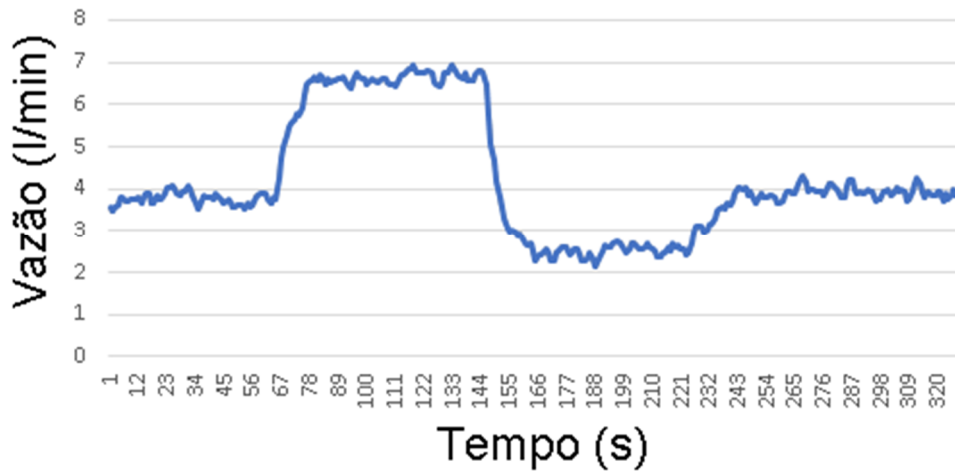


Figura 60: Comportamento da vazão ao longo do tempo

Com o teste de resposta ao degrau é possível obter o modelo do processo. Para obter o modelo foi utilizada a ferramenta *System Identification Toolbox* do software MATLAB (MATLAB, 2017).

Observou-se variação da vazão mediante as mudanças na abertura da válvula.

Com o teste efetuado, os dados foram inseridos no sistema de identificação do MATLAB.

Após definir o intervalo dos dados (primeiros 5 minutos), e aplicar a remoção das médias foi possível identificar o modelo do processo secundário no domínio da frequência (s), sendo representado pela função $G2(s)$ determinada conforme Equação (1):

$$G2(s) = \frac{0,21236}{7,1812s + 1} \quad (1)$$

Na Figura 61 é mostrado o gráfico que representa a resposta ao degrau.

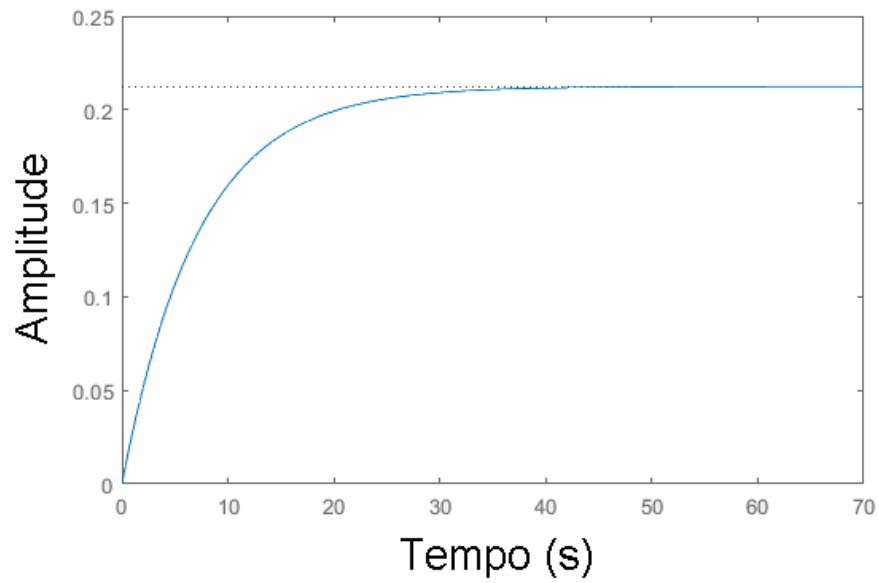


Figura 61: Vazão – resposta ao degrau

Identificado o processo, foi utilizado o SIMULINK (SIMULINK, 2017) no desenvolvimento do controlador secundário $C2(s)$.

Aplicando a sintonia foi definido o controlador, dado pela Equação (2):

$$C2(s) = 5,7 + 1,27 \frac{1}{s} \quad (2)$$

Com o controlador de vazão definido foram iniciados os testes de vazão.

a) Primeiro cenário

Este cenário considera o material com as características descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Características do minério no primeiro cenário de vazão

Horário	Superfície específica (cm ² /g)	Umidade <i>filter cake</i> (%)	SiO ₂ (%)
01:00	1580	11,39	3,55
02:00		10,59	
03:00	1720	10,91	3,40
04:00		10,80	
05:00	1750		3,35
06:00			
07:00	1540		2,89
08:00		10,41	
09:00	1420	10,15	2,57
10:00		11,04	
11:00	1590	10,76	2,62
12:00			
13:00			2,89
14:00		11,98	
15:00	1760	11,22	3,11

Para os testes foram fixadas as seguintes variáveis:

- Frequência de rotação do tambor em 60 Hz;
- Alimentação da linha de pelotamento em 84 t/h;
- Dosagem de aglomerante (bentonita) em 0,58%.

Foi variada a vazão de água de 3 l/min para 5 l/min.

a.1) Degrau 3 l/min para 5 l/min.

Na Figura 62 é mostrado o gráfico do comportamento da média granulométrica mediante a variação de vazão de água.

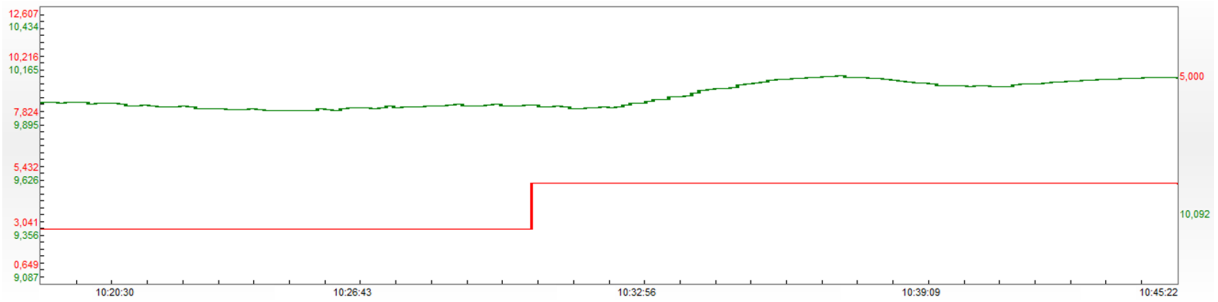


Figura 62: Comportamento da média granulométrica no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 5 l/min

Observou-se um aumento da média granulométrica. Antes da aplicação do degrau o valor era de aproximadamente 9,95 mm e, após a aplicação do degrau, o valor alcançou o pico de 10,09 mm e estabilizou em aproximadamente 10,07 mm.

A Figura 63 apresenta a variação obtida na faixa de pelotas retidas em 12,5 mm.

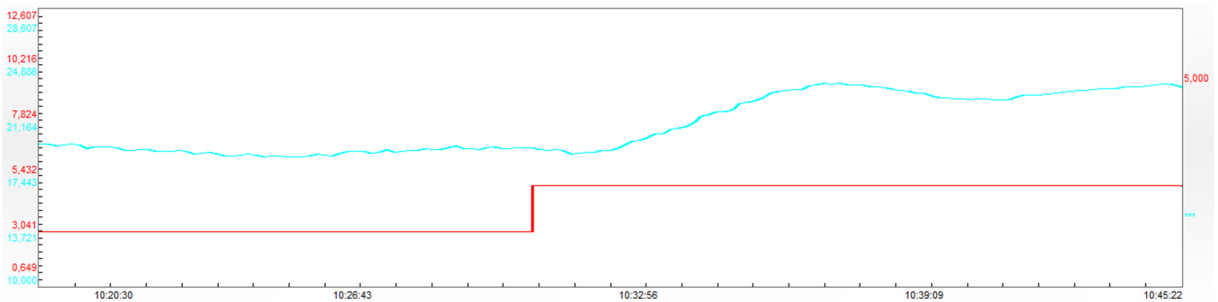


Figura 63: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 5 l/min

É observado que, após o aumento de vazão de água ocorreu um aumento no percentual de pelotas retidas em 12,5 mm. Antes da aplicação do degrau o valor era de aproximadamente 19,27%, após o degrau atingiu o valor de pico de 23,65% e estabilizou em torno de 23,08%.

Na Figura 64 é apresentado o gráfico que representa o percentual de pelotas retidas em 10 mm.

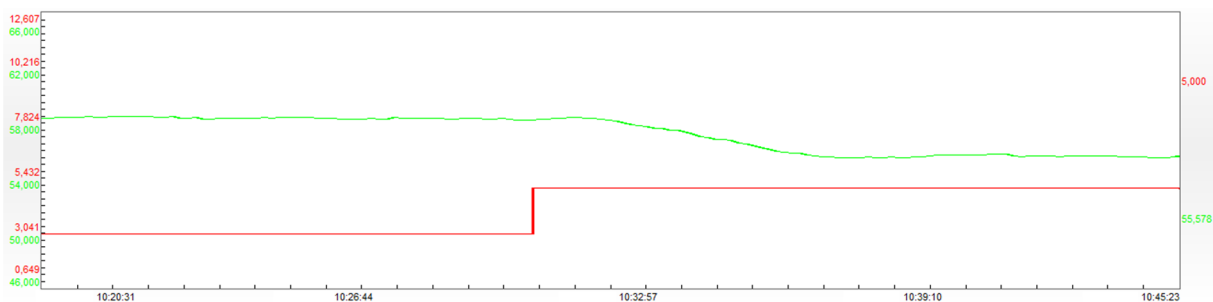


Figura 64: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 5 l/min

Mediante a aplicação do degrau, a faixa de 10 mm demonstrou o comportamento contrário a faixa de 12,5 mm, ou seja, ocorreu uma diminuição do percentual de pelotas retidas em 10 mm. Antes da aplicação do degrau o valor estava em aproximadamente 58,23%, após o degrau, alcançou valor mínimo de 55,47%, e estabilizou em aproximadamente 55,69%.

Na Figura 65 é apresentado a variação da taxa de retorno após a aplicação do degrau.

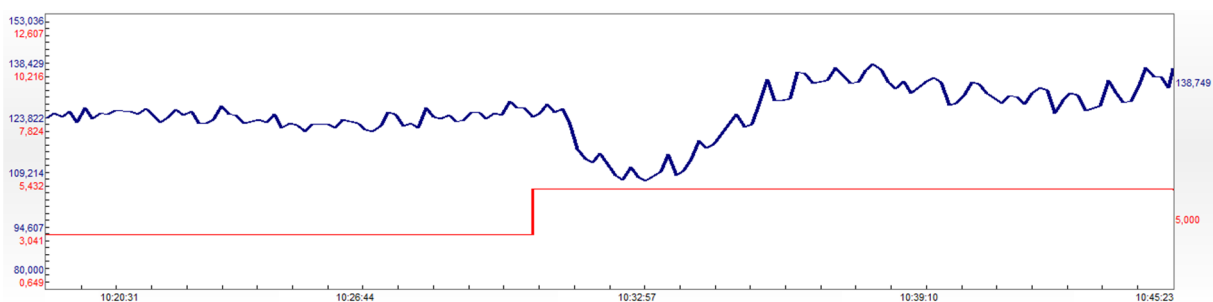


Figura 65: Comportamento da taxa de retorno no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 5 l/min

A adição de água atualmente é utilizada no intuito de diminuir a taxa de retorno. No entanto, quando aplicado o degrau, inicialmente a taxa apresentou decaimento, porém estabilizou em um valor acima do anterior ao degrau.

No momento da aplicação do degrau a taxa de retorno era de aproximadamente 128 t/h. Após a aplicação do degrau, a vazão de água atingiu valor mínimo de 108 t/h e posteriormente aumentou, atingindo 140 t/h.

a.2) Degrau 3 l/min para 7 l/min.

O cenário para o degraú é o mesmo apresentado na Tabela 3, porém com a alimentação em 90 t/h.

Ocorreram mudanças na produção sendo necessário reduzir a vazão de água. Após a estabilização da usina de pelotização, foi reiniciado o teste.

Para os testes foram fixadas as seguintes variáveis:

- Frequência de rotação do tambor em 60 Hz;
- Alimentação da linha de pelotamento em 90 t/h;
- Dosagem de aglomerante (bentonita) em 0,58%.

Foi variada a vazão de água de 3 l/min para 7 l/min.

A Figura 66 apresenta a resposta da média granulométrica mediante a variação de vazão.

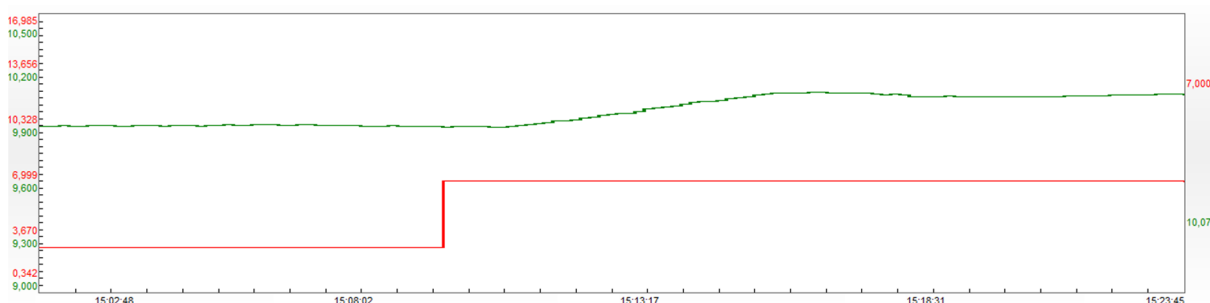


Figura 66: Comportamento da média granulométrica no teste de vazão: 1º cenário, degraú 3 l/min para 7 l/min

É observado que após a aplicação do degraú ocorreu o aumento do valor médio de granulometria. Inicialmente o valor estava em 9,89 mm, após o degraú atingiu valor máximo de 10,07 e estabilizou em aproximadamente 10,05 mm.

Na Figura 67 é mostrada a resposta da faixa de pelotas retidas em 12,5 mm.

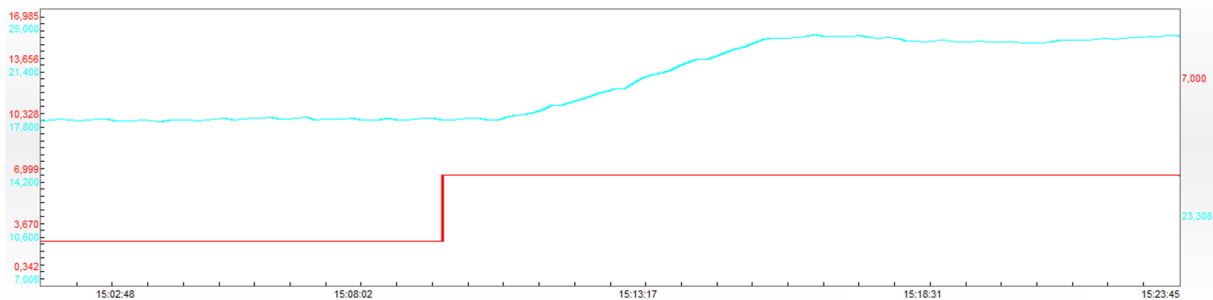


Figura 67: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 7 l/min

É visto que mediante o aumento de vazão ocorreu o aumento no percentual de pelotas retidas em 12,5 mm. Antes da aplicação do degrau o percentual estava em aproximadamente 17,89%, após o degrau alcançou valor máximo de 23,35% e estabilizou em aproximadamente 23,17%.

A Figura 68 apresenta o comportamento da faixa de pelotas retidas em 10 mm.

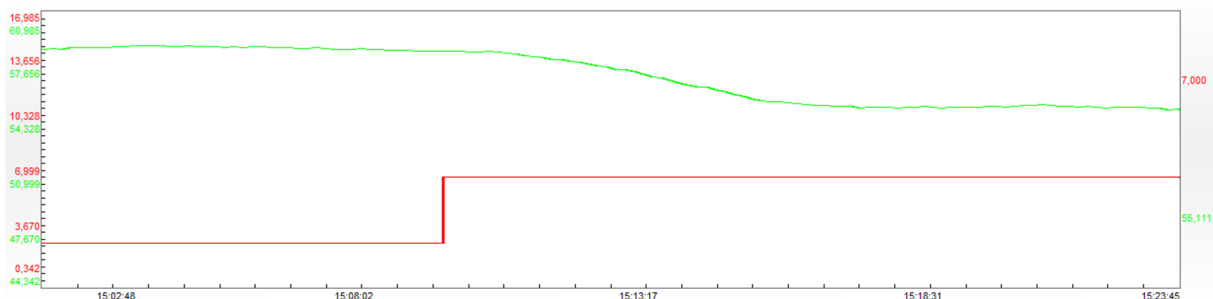


Figura 68: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 7 l/min

Da mesma forma que na aplicação do degrau de 3 l/min para 5 l/min, o percentual de pelotas retidas em 10 mm diminuiu. Antes da aplicação do degrau o percentual estava em aproximadamente 58,59%, após o degrau atingiu o valor mínimo de 55,32% e estabilizou em aproximadamente 55,18%.

Na Figura 69 é mostrado o comportamento da taxa de retorno.

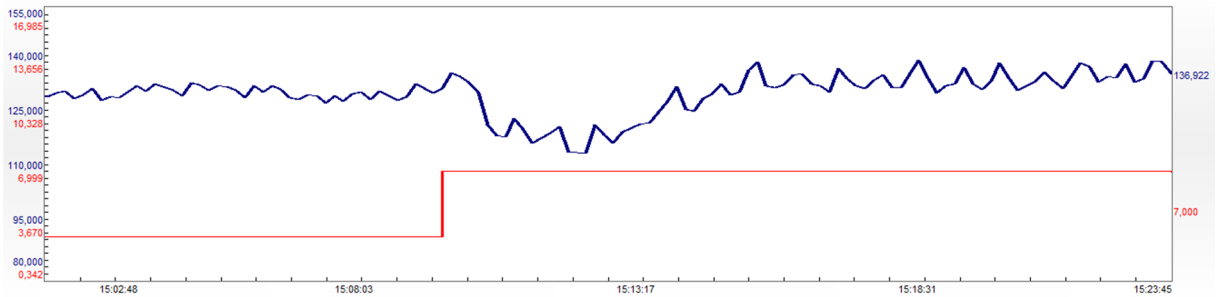


Figura 69: Comportamento da taxa de retorno no teste de vazão: 1º cenário, degrau 3 l/min para 7 l/min

Com a aplicação do degrau a taxa de retorno oscilou, primeiramente diminuindo, e em seguida ocorreu o aumento do valor. Antes da aplicação do degrau o valor era de aproximadamente 132 t/h, após o degrau atingiu valor mínimo de 115 t/h logo após aumentando. O valor de estabilidade ficou em aproximadamente 135 t/h.

b) Segundo cenário

Este cenário considera o material com as características descritas na Tabela 4.

Tabela 4: Características do minério no segundo cenário de vazão

Horário	Superfície específica (cm ² /g)	Umidade <i>filter cake</i> (%)	SiO ₂ (%)
01:00	1770	10,89	4,52
02:00	1760	10,59	
03:00	1720	10,89	4,55
04:00	1690	10,60	
05:00		10,69	4,72
06:00	1580	10,40	
07:00	1670	10,59	4,52
08:00	1700	10,27	
09:00	1730	11,04	4,45
10:00	1750	10,98	
11:00	1770	11,10	4,71
12:00	1840	10,70	
13:00	1620	10,87	5,21

Para os testes foram fixadas as seguintes variáveis:

- Frequência de rotação do tambor em 58 Hz;

- Alimentação da linha de pelotamento em 104 t/h;
- Dosagem de aglomerante (bentonita) em 0,54%.

Foi variada a vazão de água de 2 l/min para 9 l/min.

b.1) Degrau 2 l/min para 9 l/min.

Na Figura 70 é apresentado o gráfico que representa a média granulométrica em resposta ao degrau de vazão.

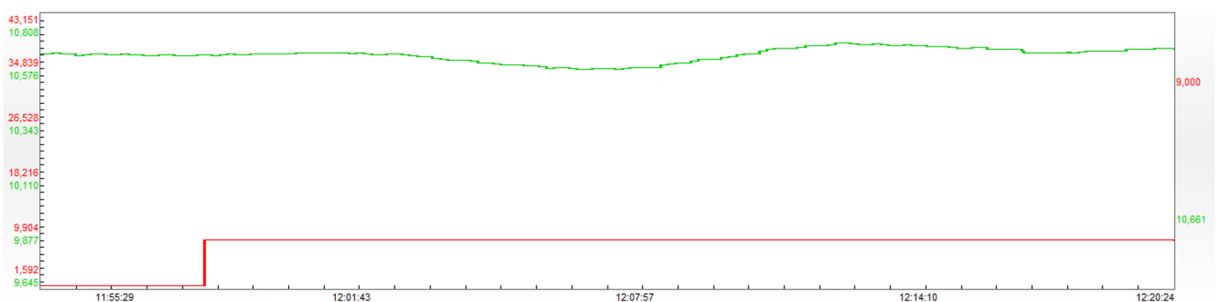


Figura 70: Comportamento da média granulométrica no teste de vazão: 2º cenário, degrau 2 l/min para 9 l/min

É observado que mediante a aplicação do degrau ocorreu variação da granulometria após aproximadamente 3 minutos; porém, comparado ao teste do primeiro cenário, o resultado foi diferente, não sendo possível notar aumento devido a adição de água. Provavelmente as características mineralógicas no segundo cenário não favorecem a adição de água visando o aumento da granulometria.

Na Figura 71 é apresentado o gráfico relacionado ao percentual de pelotas retidas em 12,5 mm.

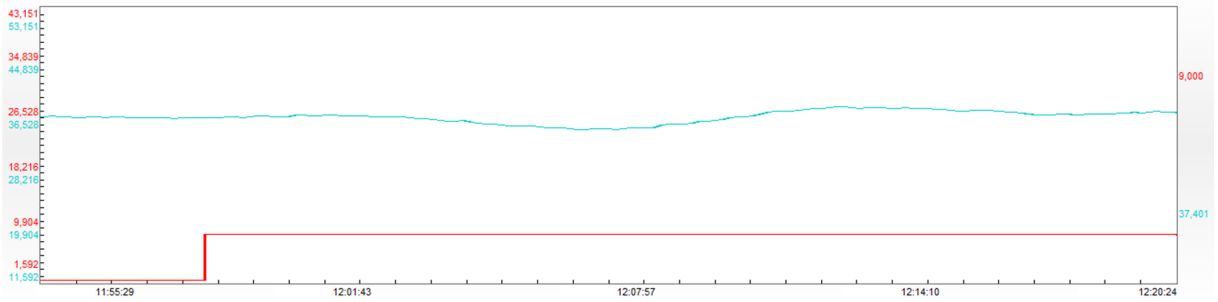


Figura 71: Comportamento na faixa de 12,5 mm no teste de vazão: 2º cenário, degrau 2 l/min para 9 l/min

Da mesma forma que a média granulométrica, não é possível dizer que ocorreu aumento do percentual mediante a adição de água.

Na Figura 72 é apresentado o gráfico relacionado ao percentual de pelotas retidas em 10 mm.

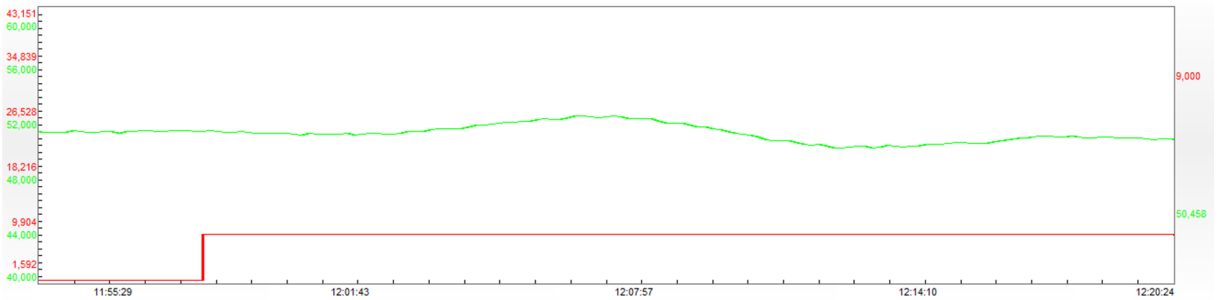


Figura 72: Comportamento na faixa de 10 mm no teste de vazão: 2º cenário, degrau 2 l/min para 9 l/min

O comportamento da faixa de pelotas retidas em 10 mm mostra oscilações contrárias à faixa de 12 mm; porém também não é notado o aumento, ou diminuição considerável no percentual de pelotas retidas.

A Figura 73 mostra o gráfico relacionado à taxa de retorno.

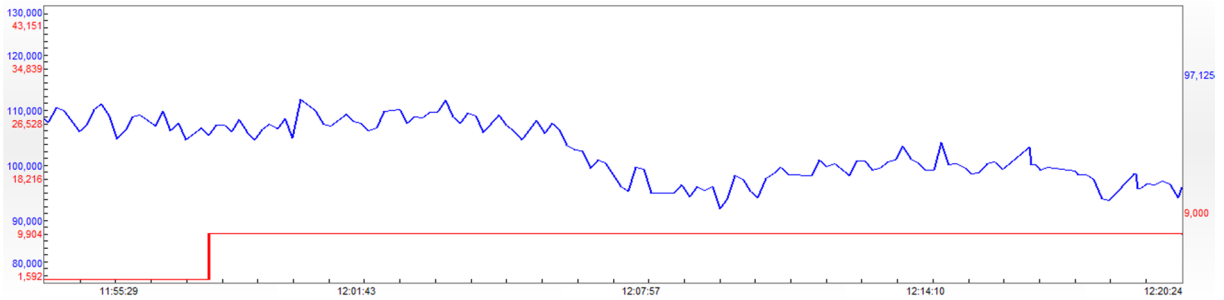


Figura 73: Comportamento da taxa de retorno no teste de vazão: 2º cenário, degrau 2 l/min para 9 l/min

O comportamento observado na taxa de retorno é coerente com a ação que os operadores tomam quando a respectiva taxa aumenta, ou seja, eles atuam adicionando mais água no intuito de diminuir a taxa de retorno. Antes do degrau a taxa estava em aproximadamente 107 t/h, quando aplicado o degrau a taxa de retorno diminuiu estabilizando em aproximadamente 99 t/h.

4.3.4 Considerações dos testes de preliminares

Todas as variáveis citadas mostraram ter algum impacto em relação à granulometria e taxa de retorno. No entanto, não foi possível observar mudanças significativas em todos os testes, ou concluir a respeito do comportamento do processo. Observando as tabelas que apresentam os cenários de qualidade da usina nota-se que ocorre grande variação de qualidade, e tal variação tem impacto no comportamento do processo.

Os testes de alimentação mostraram que eles têm impacto em relação à granulometria; no entanto, o comportamento é diferente do que na rotação. Exemplo dessa diferença está no fato de que as faixas granulométricas de 10 mm e 12,5 tiveram comportamento semelhante quando submetidas ao degrau de alimentação. Quando submetidas ao degrau de rotação tiveram comportamento oposto, uma aumentando, e a outra diminuindo. Já os testes de vazão de água apresentaram comportamento semelhante aos testes de rotação no que diz respeito às faixas de 12,5 mm e 10 mm.

Os testes de rotação evidenciam que as diferentes características do material influenciam no comportamento granulométrico das pelotas. É observado que em alguns testes o processo se

tornou mais instável. O fato de a superfície específica estar maior no segundo cenário do teste de rotação, e a umidade estar menor tornou necessária a adição de água. Isso prejudicou a análise, já que mais de uma variável foi alterada (rotação e vazão de água). Assim, não é correto concluir sobre a granulometria apenas com base na variação da rotação, principalmente no terceiro e quarto degraus.

Como optou-se por adicionar água como forma de correção da taxa de retorno, é notado que esta variável precisa ser controlada, até mesmo por que a atuação foi manual. Desta forma, como descrito no teste de vazão de água, foi definido o controlador para o processo e analisado o comportamento mediante as variações de vazão.

Nos testes de vazão foi observada resposta evidente no primeiro cenário; no entanto, não compatível com a atuação que o operador tem, ou seja, a taxa de retorno não diminuiu. Já no segundo cenário foi observado comportamento compatível com o do operador, ou seja, a taxa de retorno diminuiu, porém não ocorreu mudança considerável na granulometria.

Visando a substituição da atuação manual do operador optou-se por desenvolver um controle voltado para a vazão de água, o que é detalhado na próxima Seção.

4.4 Proposta

Sempre que ocorrem grandes variações na taxa de retorno, os operadores de campo recorrem à atuação manual na injeção de água. Dessa forma, a taxa de retorno de pelotas volta a patamares aceitáveis.

Durante alguns testes realizados ocorreram situações em que o operador de campo recorreu à injeção de água para evitar aumento excessivo da taxa de retorno. Analisando o cenário de atuação do operador e comparando com os testes de vazão observou-se que existe a necessidade de evitar a atuação manual do operador de campo.

É proposta, então, a automatização da injeção de água. Tal automatização visa a adequação da granulometria utilizando a adição de água.

Como mostrado nos testes de variação da vazão de água, foi instalada uma válvula de controle e desenvolvido um controlador PI para a vazão de água; desta forma sendo possível variar a adição de água de acordo com a necessidade do processo.

Foi definido juntamente com a equipe de processo, premissas relacionadas aos pontos em que são possíveis adicionar água. Foi escolhido o ponto mais interno, próximo à alimentação. Tal ponto visa, além de aumentar a granulometria, evitar o arraste de material que prejudica a formação de pelotas.

Para automatização e desenvolvimento do controle de granulometria é necessária a identificação do modelo do processo e, posteriormente, o desenvolvimento de controladores. Para o levantamento da função de transferência foi feita uma modelagem baseada na relação de dados de entrada e saída do processo. Para tal, é aplicado o método de resposta ao degrau; o qual, mediante uma variação na entrada produz uma variação na saída, e de acordo com a relação entre elas é gerado um modelo do processo.

Como o objetivo é controlar a granulometria e tornar a alimentação na etapa de queima mais homogênea, busca-se a maximização de uma determinada faixa granulométrica. A faixa escolhida para testes foi a de 12,5 mm. Dessa forma, deve-se elevar o percentual de pelotas contidas nessa faixa. Conseqüentemente, a média granulométrica também será elevada.

Para controlar a granulometria em função da vazão de água, primeiramente é necessário controlar a vazão propriamente, em seguida a granulometria. Sendo assim, foi pensado e desenvolvido um controle em cascata.

Segundo Shinskey (1979), o controle em cascata é aquele no qual a saída de um controlador é utilizada para manipular o *set point* de outro controlador. Na concepção do controle em cascata existe a malha primária e a malha secundária. A malha primária possui o *set point* independente, já a secundária depende da saída do controlador primário como *set point*.

Na Figura 74 é mostrado o diagrama do controle em cascata.

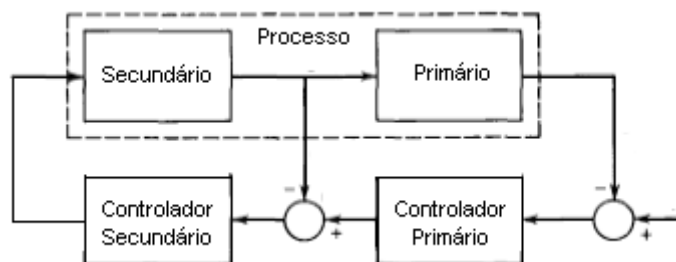


Figura 74: Diagrama do controle em cascata

Como o objetivo é controlar a faixa granulométrica, essa é a malha primária, e a vazão a secundária. De acordo com o *set point* requerido da faixa granulométrica, o *set point* de vazão de água é determinado.

A seguir, é detalhado o desenvolvimento do controle em cascata.

O controlador secundário (vazão) foi descrito na Seção 3 deste capítulo. Com o controlador de vazão adequado, o passo seguinte é a obtenção do modelo do processo e controlador primário.

Primeiramente é necessário entender o cenário encontrado na planta para o desenvolvimento do controle.

Na Tabela 5 é apresentado o cenário no qual foi desenvolvido o controlador.

Tabela 5: Características do minério para o controlador

Horário	Superfície específica (cm ² /g)	Umidade <i>filter cake</i> (%)	SiO ₂ (%)
03:00	1470	10,31	3,82
04:00		10,39	
05:00	1555	10,62	4,04
06:00		10,30	
07:00	1433	10,50	4,04
08:00		10,69	
09:00	1547	11,37	4,40
10:00		11,48	
11:00	1562	10,56	4,07
12:00		10,07	
13:00	1440	11,20	4,20

Como pode ser observado, ocorreram algumas variações, porém, dentro de padrões aceitáveis.

Para os testes foram fixadas as seguintes variáveis:

- Frequência de rotação do tambor em 60 Hz;
- Alimentação da linha de pelotamento em 100 t/h;
- Dosagem de aglomerante (bentonita) em 0,54%.

Posteriormente, foi efetuado teste de resposta ao degrau relacionando a vazão com a granulometria obtida.

Foram aplicados diferentes degraus, porém devido a variações no processo, foi reavaliada a aplicação dos testes e feita uma nova aplicação de resposta ao degrau.

Foi aplicado degrau na vazão de água de 3 l/min para 7 l/min.

Na Figura 75 é mostrado o gráfico que representa o degrau aplicado.

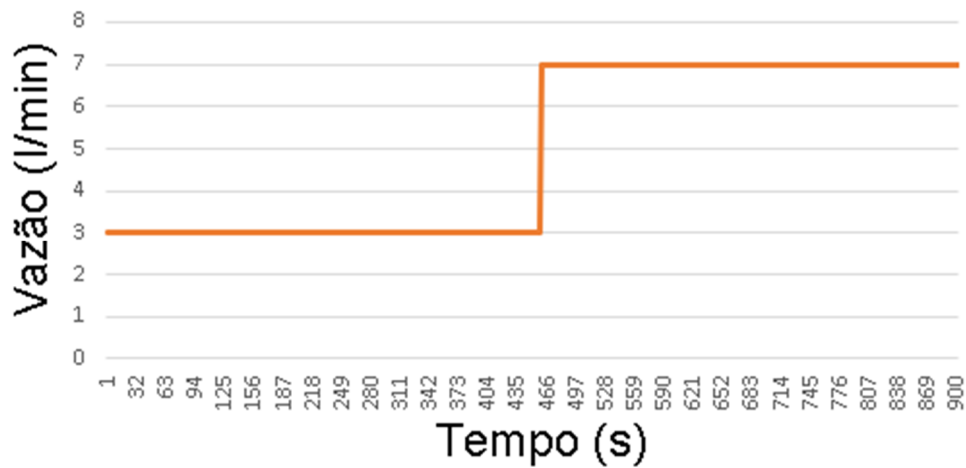


Figura 75: Degrau de vazão: 3 l/min para 7 l/min

Na Figura 76 é mostrada a resposta mediante ao degrau aplicado.

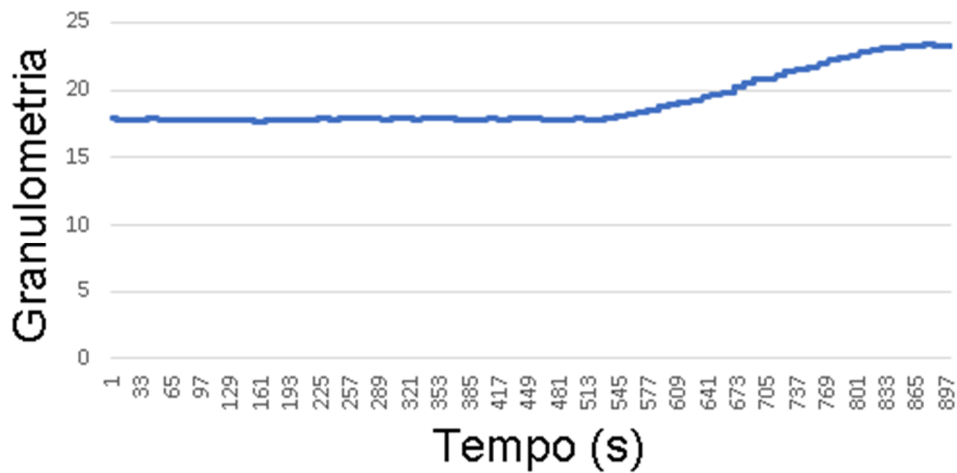


Figura 76: Comportamento da granulometria em relação ao degrau de vazão

Observa-se que houve variação e o processo é bem mais lento que o processo secundário (vazão de água).

Com a ferramenta de identificação de sistemas do MATLAB foi obtido o modelo para o processo primário, representado pela função $G1(s)$ conforme Equação (3):

$$G1(s) = \frac{2,207}{8836s^2 + 188s + 1} \quad (3)$$

Na Figura 77 é mostrado o gráfico que representa a resposta ao degrau.

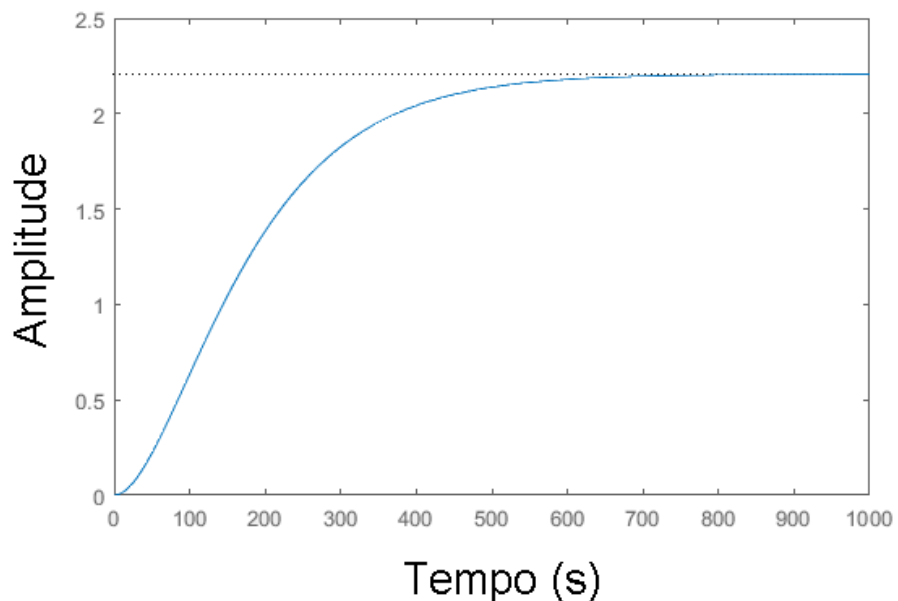


Figura 77: Resposta da granulometria em relação ao degrau de vazão

Com o processo identificado, foi desenvolvido, com o auxílio do SIMULINK, o controlador primário $C1(s)$, conforme Equação (4):

$$C1(s) = 0,895 + 0,004 \frac{1}{s} \quad (4)$$

Também foi optado pelo uso de controlador PI, embora a granulometria seja uma malha mais lenta. Tal decisão foi tomada visando a um cenário mais conservador, e para evitar que situações relacionadas a erros de medição granulométrica (luminosidade da câmera, por exemplo) interferissem nos testes.

Com os controles desenvolvidos, foi efetuado teste computacional do controlador com a utilização do SIMULINK. Foi aplicado o *set point* de 22% para a faixa granulométrica desejada, ou seja, as pelotas entre 12,5mm e 16 mm devem compor cerca de 22% das pelotas produzidas.

Na Figura 78 é mostrada a resposta obtida.

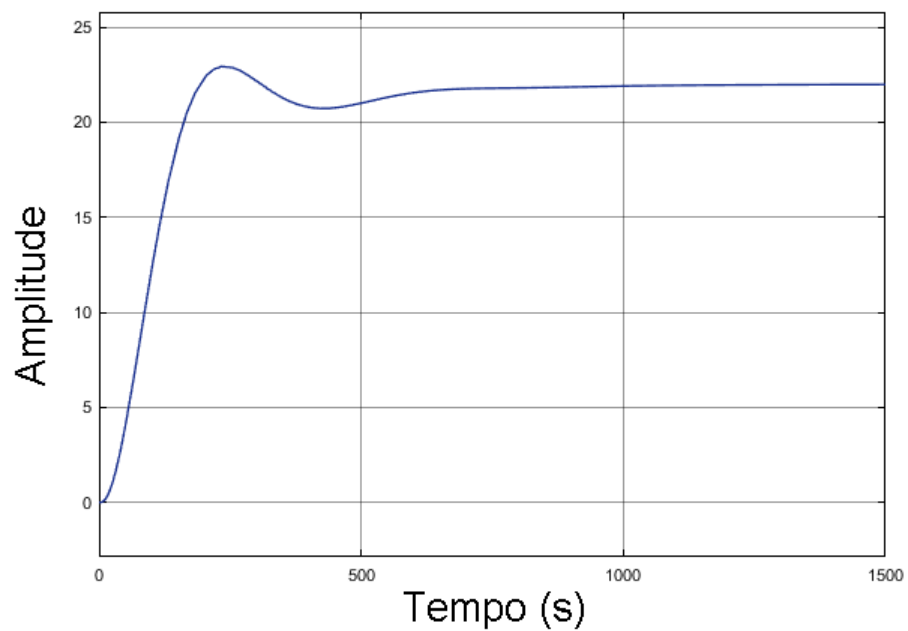


Figura 78: Simulação do controlador em cascata

É possível identificar que ocorreu *overshoot* na busca pelo set point de 22% e o tempo de estabilização é superior a 700 segundos.

5 TESTE OPERACIONAL

Neste capítulo é relatado um teste operacional e observado o comportamento do processo.

O teste foi aplicado no mesmo cenário que o apresentado na Tabela 5.

A faixa granulométrica de 12,5 mm a 16 mm estava em torno de 17%, então foi aplicado o *set point* de 22%.

A Figura 79 mostra a mudança do *set point*.

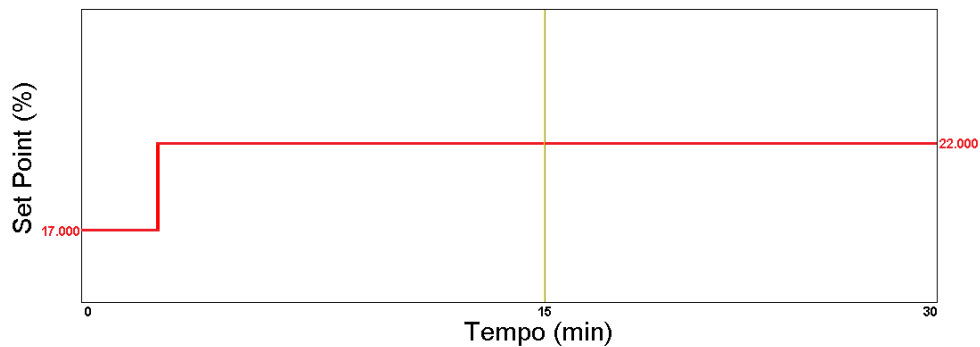


Figura 79: Variação do *setpoint* na simulação do controlador em cascata

A Figura 80 mostra o comportamento gráfico obtido no processo quando alterado o *setpoint*.

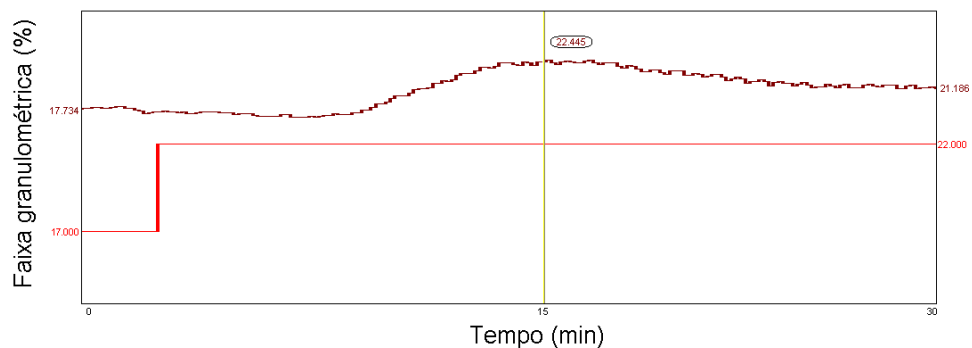


Figura 80: Comportamento do processo com o controlador em cascata

O gráfico mostra um intervalo de 30 minutos, sendo observado um comportamento mais lento do que o em simulação.

Da mesma forma que no teste simulado, ocorreu *overshoot*, chegando a 22,445% a porcentagem de pelotas na faixa granulométrica desejada. Ao final dos 30 minutos a porcentagem estava em 21,186%.

Analisando o comportamento obtido do processo em relação ao controle, é possível dizer que a adição de água, no ponto proposto, tende a aumentar a granulometria. No entanto, a variável controlada não apresentou estabilização no *set point* requerido, mesmo contendo integrador, ficando pouco abaixo do desejado.

O erro apresentado em regime permanente pode sugerir que alguma característica física, ou química, do processo esteja influenciando o resultado. Como exemplo, pode ter ocorrido a saturação de umidade, visto que a carga de material é recirculante.

A saturação de umidade pode fazer com que o processo apresente comportamento de diminuição da granulometria, e não o aumento do tamanho das pelotas. Tal característica ocorre devido ao fato da massa de material tornar-se mais liquefeita, o que dificulta a formação de pelotas.

O controle tende a melhorar a homogeneidade das pelotas, porém alguns parâmetros precisam ser reavaliados, como o ponto de saturação de umidade por exemplo. Outro ponto que precisa ser reavaliado é o tempo de estabilização, que foi longo. Portanto, deve-se estudar a possibilidade de atuação mais rápida, analisar outras variáveis que influenciam o processo e identificar possíveis distúrbios.

A planta apresenta grande variação da qualidade de minério devido as diferentes frentes de lavra, portanto, esses elementos devem ser levados em consideração.

Outro ponto que deve ser considerado é a manipulação de todos os pontos de adição de água, pois, mediante diversas circunstâncias, pode-se adicionar água visando a atender outros objetivos, como a criação de novas “sementes” de pelotas. O ponto em questão é o de retorno de pelotas pequenas, e não o interno.

A manipulação da rotação também deve ser adicionada ao controle, e, de acordo com os estudos que devem ser realizados, unir os controles de rotação e adição de água.

Como o processo possui diversas variáveis, é sugerida a utilização de controle especialista que possibilite o desenvolvimento de um sistema de controle que leve em consideração todas as variáveis componentes do processo.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve seu foco no problema de variabilidade de granulometria no pelotamento de minério de ferro. Para resolvê-lo analisou-se a influência da injeção de água, da rotação e da taxa de alimentação e propôs-se um controlador para a granulometria manipulando a injeção de água.

Baseado nos testes para entendimento do comportamento do processo, pode-se dizer que a manipulação da rotação dos tambores, a alimentação das linhas de pelotamento, e a injeção de água têm influência na média granulométrica, na taxa de retorno e nas faixas retidas de pelotas. Entretanto, existem condições que interferem em como as variáveis testadas influenciam no processo. Tais condições estão ligadas a características dos minérios e no desempenho de etapas anteriores ao pelotamento.

As características dos minérios que chegam para o processo de pelotização variam muito, tanto que características como umidade, superfície específica, teor de minério, que foram mostradas nos testes, apresentaram variações que podem ter influenciado em comportamentos diferentes do processo. Comportamentos que podem ser observados principalmente no segundo teste de rotação, pois a forma como o processo variou durante o teste diverge do primeiro teste.

Devido ao fato da utilização de água como fator de correção, e principalmente ao fato de ter sido usada água para amenizar os distúrbios existentes no segundo teste de rotação, foi evidenciado que a variável vazão precisava ser controlada. Caso não fosse abordado nenhum tipo de controle, sempre que necessário o operador iria optar por intervir no processo, o que influi na obtenção de dados confiáveis para desenvolver controles voltados para a rotação e alimentação.

Em relação ao controle, a vazão de água é entendida como meio de correção da taxa de retorno e adequação granulométrica, ou seja, é usada quando existem distúrbios no processo que prejudicam a formação de pelotas. A utilização de água deve ser moderada, no entanto, quando utilizada de forma manual não se tem controle da quantidade de água utilizada, dessa forma o desenvolvimento de um controle torna possível a utilização mais racional da injeção de água.

Para o desenvolvimento do controlador foi definido como objetivo elevar o percentual de pelotas na faixa retida em 12,5 mm. Desta forma também demonstrou ser elevada a granulometria média.

O controlador desenvolvido para controlar a granulometria em função da vazão de água mostrou atender, em partes, o intuito de elevar a faixa retida em 12,5 mm e a média granulométrica. No entanto, não ocorreu o atendimento preciso do *set point* requerido. Tal fato pode ter acontecido por características do processo, como o acúmulo de água no tambor, ou saturação da umidade.

O controlador pode atender a algumas necessidades do processo, mas é fato que não serão todas. Desta forma, a continuidade dos estudos é necessária e o desenvolvimento de controles que envolvam a alimentação e rotação ficam mais evidentes.

Embora por si só o controle de água não atenda todas as necessidades, agora é possível desenvolver outros controles, e quando existir a necessidade de correção por parte da utilização de água, esta estará disponível via controle automático.

Devido à grande variabilidade de diferentes minérios, observou-se que são necessárias ações nas etapas anteriores ao pelotamento. Um exemplo seria a implementação de equipamentos que possam melhorar a superfície específica, como é o caso da utilização de *roller press*, que consiste em uma prensa de rolos, em algumas usinas.

Por fim, é possível concluir que os estudos apontam para que seja feita a interação de controladores que possam adequar e homogeneizar a granulometria da forma desejada. O controlador desenvolvido até agora atende a alguns cenários de processo, não a todos. Porém, é mais um passo para o desenvolvimento completo do sistema de controle granulométrico. Um ponto que vale destacar é o fato de a automatização da injeção de água retirar do operador a interação manual, o que auxilia na quantificação de água adicionada ao processo.

7 TRABALHOS FUTUROS

Como existe a necessidade da criação de controles voltados para a rotação e alimentação das linhas de pelotamento, e a interação deles, fica evidente a continuidade deste trabalho.

Quanto ao controle de água, pode ser abordado o controle para todos os pontos de injeção, visto que eles possuem características diferentes.

Para interação dos controles podem ser utilizados meios baseados em inteligência artificial, como lógica *fuzzy*, redes neurais, *neurofuzzy*, dentre outros métodos.

Outro ponto é relacionado ao desempenho das linhas de pelotamento, e do pelotamento como um todo. Quando desenvolvidos os controles de alimentação, pode ser necessário, de acordo com o cenário de processo, redistribuir a alimentação retida em determinada linha para outra que estiver com desempenho melhor, desta forma minimizando os impactos na produção.

8 PRODUÇÕES OBTIDAS

Com a realização desta pesquisa foi gerado o seguinte artigo:

Título: Sistema de Controle Granulométrico de Pelotas de Minério de Ferro: um estudo de caso

Autores: Ítalo da Silva Magalhães Dias, Marcone Jamilson Freitas Souza, Frederico Gadelha Guimarães

Evento: XXII Congresso Brasileiro de Automática

Local: João Pessoa (PB)

Data: 09 a 12 de setembro de 2018

REFERÊNCIAS

ABOUZEID, A. Z. M; SEDDIK, A. A. (1980). Effect of Iron Ore Properties on its Balling Behaviour. *Powder Technology*. v.29, p. 233 - 241, 1981.

ARBEITHUBER, C.; JÖRGL, H. P.; RAML, H. (1994). Fuzzy Control of an Iron Sintering Plant. *Control Eng. Practice*. v.3, p. 1669 - 1674, 1995.

BORIM, José Carlos. **Modelagem e Controle de um Processo de Endurecimento de Pelotas de Minério de Ferro**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

CHAGAS, M., Machador, M. L. P., SOUZA, J. B. C. e JESUS, E. F. (2015). Análise da Influência das Características Granulométricas na Permeabilidade do Leito de Pelotas Através do Método das Redes Neurais Artificiais, *In: 45º Ironmaking, 16º Iron Ore, 3º Agglomeration*. Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração, Rio de Janeiro: ABM, pp. 188 – 196.

FORSMO, S. P. E.; SAMSKOG, P. –O.; BJÖRKMAN, B. M T. (2007). A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness. *Powder Technology*. v.181, p. 321 - 330, 2008.

FONSECA, Maurício Cota. **Influência da Distribuição Granulométrica do Pellet Feed no Processo de Aglomeração e na Qualidade da Pelota de Minério de Ferro para Redução Direta**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

KNUT, Rapp; NYMAN, Per-Ole. (2003). Control of the Amplitude in a Surging Balling Drum Circuit, a New Approach to an Old Problem. *Modeling, identification and control*. v.24, p. 193, 2003.

MATLAB: Linguagem de programação (2017). Versão R2017a. Natick, Massachusetts: MathWorks Inc.

MATOS, A. P. **Influência da Temperatura, Pressão, Produção e Granulometria no Processo de Secagem das Pelotas Cruas**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

MEYER, Kurt. **Pelletizing of Iron Ores**. New York: Springer, 1980.

MONTEIRO, Alessandro Marques. **Modelagem Neural de um Processo de Produção de Pelotas de Minério de Ferro**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

NUNES, José Eduardo Fernandes. **Controle de um Processo de Pelotização: Realimentação por Imagem**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

NUNES, Sérgio Fernando. **Influência da Carga Circulante do Pelotamento na Qualidade Física das Pelotas Cruas e Queimadas da Samarco Mineração**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.

PIETSCH, Wolfgang. **Size Enlargement by Agglomeration**. New York: John Wiley & Sons, 1991.

RAPP, K. and NYAMN, P. (2003). Control of Amplitude in a Surging Balling Drum Circuit, a New Approach to an Old Problem. *Modeling, Identification and Control*, 24, pp. 193 – 203.

THURLEY, Matthew; ANDERSON, Tobias. (2007). An industrial 3D vision system for size measurement of iron ore green pellets using morphological image segmentation. *Minerals Engineering*. v.21, p. 405 - 415, 2008.

SHINSKEY, F. G. (1979). **Process Control Systems**. New York: McGraw Hill.

SIMULINK: Simulation and Model-Based Design (2017). Natick, Massachusetts: MathWorks Inc.

SJOBERG, Borge Gustav; ODMAN, Rolf Ragnar; BELSTAD, Arne; LOFGREN, Nils Clov Allan. US Pat. 3900293, 19 ago.1975. 7p. Controlling admixture of aqueous liquid to ball rolling of powdery iron ore.

VIDAL, Leonardo de Carvalho. **Aplicação Fuzzy X PID: Técnicas de Controle em Ambientes Simulados**.1ª Ed. Curitiba: Appris, 2015.

YANG, Gui-ming; FAN, Xiao-hui; CHEN, Xu-ling; HUANG, Xiao-xian; LI, Zong-ping. (2016). Intelligent Control of Grate-kiln-cooler Process of Iron Ore Pellets Using a Combination of Expert System Approach and Takagi-Sugeno Fuzzy Model. *Journal of Iron and Steel Research, International*. v. 23, n. 5, p. 434 - 441, 2016.