



**MARCELO DE CASTRO SOUZA**

**CONTROLE DE NÍVEL DE CAMADA PARA FORNOS DE GRELHA EM USINAS  
DE PELOTIZAÇÃO**

**São Luís, MA**

**2023**

**MARCELO DE CASTRO SOUZA**

**CONTROLE DE NÍVEL DE CAMADA PARA FORNOS DE GRELHA EM USINAS  
DE PELOTIZAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista em Especialização em Automação para Processos de Mineração

Área de concentração:

Orientador: José Manuel Gonzalez Tubio Perez, DSc  
Coorientador: Thomas Vargas Barsante e Pinto, MSc

**São Luís, MA**

**2023**

Título: Controle de nível de camada para fornos de grelha em usinas de pelotização

**Classificação:** ( ) Confidencial ( ) Restrita ( ) Uso Interno ( x ) Pública

**Informações Confidenciais** - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

**Informações Restritas** - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

**Informações de Uso Interno** - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

**Informações Públicas** - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação(CIP)

S238c

Souza, Marcelo de Castro

Controle de nível de camada para fornos de grelha em usinas de pelotização. Marcelo de Castro Souza... [et al.] - Ouro Preto, MG: ITV, 2023.

34 p.: il.

Monografia (Especialização *latu sensu*) - Instituto Tecnológico Vale, 2023.

Orientador: José Manuel Gonzalez Tubio Perez

Coorientador: Thomas Vargas Barsante e Pinto

1. Pelotização. 2. Forno de Gelha Pelotização. 3. Estratégia de controle. 4. Controle Antecipatório. I. Perez, José Manuel Gonzalez Tubio. II. Pinto, Thomas Vargas Barsante e. III. Título.

CDD.23. ed. 629.892

**Marcelo de Castro Souza**

**CONTROLE DE NÍVEL DE CAMADA PARA FORNOS DE GRELHA EM  
USINAS DE PELOTIZAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Automação para Processos de Mineração].

Orientador: Prof. D.Sc. José Manuel Gonzalez Tubio Perez

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 05 de dezembro de 2023 pela banca examinadora constituída pelos professores:

---

Prof. D.Sc. José Manuel Gonzalez Tubio Perez  
Orientador – Instituto Tecnológico Vale

---

Prof. MSc. Thomás Vargas Barsante e Pinto  
Coorientador – Instituto Tecnológico Vale

---

Prof. D.Sc. Gustavo Pessin  
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale

---

MSc. Gercilio Carlos Zuqui Junior  
Membro externo – Vale

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).



## PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/8E13-E7B3-C965-3329> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale . To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/8E13-E7B3-C965-3329> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: 8E13-E7B3-C965-3329



### Hash do Documento

759A51F269C007B348BBE3E6A5FD82C216DDB727FF3B0D990688570D84086EE6

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 28/02/2024 é(são) :

- José Manuel Gonzalez Tubio Perez (Signatário) - em 28/02/2024 13:11 UTC-03:00

**Tipo:** Assinatura Eletrônica

**Identificação:** Por email: jose.perez@itv.org; Código de acesso: 1

### Evidências

**Client Timestamp** Wed Feb 28 2024 13:10:27 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

**Geolocation** Latitude: -22.9168907 Longitude: -43.233892 Accuracy: 13.71

**IP** 179.162.91.1

#### Hash Evidências:

607F5FA383CABDDDBADD239AE21E4875A88275AC446F3CD70A5D154F2ACE0DD12

- GUSTAVO PESSIN (Signatário) - 939.084.900-49 em 28/02/2024 11:53 UTC-03:00

**Tipo:** Assinatura Eletrônica

**Identificação:** Por email: gustavo.pessin@itv.org; Código de acesso: 1

### Evidências

**Client Timestamp** Wed Feb 28 2024 11:54:05 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

**Geolocation** Latitude: -19.9426048 Longitude: -43.9222272 Accuracy: 1500.2768150676472

**IP** 201.8.93.45

#### Hash Evidências:

B0FB1DE90E9F23F5FFCD9E3AC935A29968846F27C3DDEE1F39D9F8DE151121AB

- Gercilio Carlos Zuqui Junior (Signatário) - em 28/02/2024 11:06 UTC-03:00

**Tipo:** Assinatura Eletrônica

**Identificação:** Por email: gercilio.zuqui@vale.com; Código de acesso: 1

#### Evidências

**Client Timestamp** Wed Feb 28 2024 11:06:32 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

**Geolocation** Latitude: -19.647104 Longitude: -43.252541 Accuracy: 891

**IP** 200.6.35.101

#### Hash Evidências:

5B9B8BDE182F29E3A6BCEBDF6E4DA3F78FCDA2ADEBDE29AD6FF0AED484A854A4

- ☑ Thomás Vargas Barsante e Pinto (Signatário) - 115.302.536-16 em 28/02/2024 11:06 UTC-03:00

**Tipo:** Assinatura Eletrônica

**Identificação:** Por email: thomas.pinto@itv.org; Código de acesso: 1

#### Evidências

**Client Timestamp** Wed Feb 28 2024 15:05:24 GMT+0100 (Horário Padrão da Europa Central)

**Geolocation** Location not shared by user.

**IP** 81.36.146.65

#### Hash Evidências:

3CED67642EBE5FBE9C3F189426C394C3F664BE5C7AC6BF369CBE71A7EA94736E



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que tenho e sou, pois como sua palavra diz “porque sem mim nada podeis fazer.” João 15.5.

Agradeço a minha família, esposa e filhos, por me incentivarem e por acreditarem em mim. E a Vale nas pessoas do Rodrigo Albuquerque e Flavio Thimoteo, meu coordenador e gerente no início deste curso, assim como os companheiro de trabalho da Tecnologia MA e da Pelotização de São Luís.

*“O piloto automático da sua vida são seus pensamentos... Para seguir na direção certa é preciso ter os pensamentos corretos. Se quisermos mudar de vida, temos que mudar o que acreditamos.” JB Carvalho.*

## RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de descrever o controle implementado na Usina de Pelotização de São Luis - MA para o controle de nível de camada de pelotas de minério de ferro em um forno tipo grelha do processo de pelotização, onde existem basicamente dois tipos de controle que podem ser implementados: PID (Proporcional, Integral e Derivativo) ou PID com controle antecipatório, sendo que este pode ser aplicado de duas maneiras distintas: o primeiro com o controle PID sendo o mais atuante no sistema e um segundo onde o controle antecipatório é o mais relevante para o sistema, o que reduz o grau de liberdade de atuação na malha de controle. Neste trabalho serão confrontadas as duas estratégias de controle para identificar qual é a mais indicada para o controle de nível de camada em um forno de pelotização tipo grelha, de forma a garantir a menor variabilidade de nível de camada.

**Palavras-chave:** Pelotização. Forno de Gelha Pelotização. Estratégia de controle. Controle Antecipatório.

**Fase da Cadeia:** Pelotização.

## ABSTRACT

This work aims to describe the control implemented at the São Luis - MA Pelletizing Plant for the layer level of Iron Ore Pellets in a Grid type furnace of the Pelletizing process, where there are basically two types of control that can be implemented: PID (Proportional, Integral and Derivative) or PID with Anticipatory Control, that can be applied in two different ways, the first with PID control is the most active in the system, and a second where anticipatory control is the most relevant for the system, a second where anticipatory control is the most relevant for the system, which reduces the freedom of action in the control system. In this work, the two anticipatory PID control strategies will be compared to identify which is the most suitable for Layer Level control in a Grid Type Pelletizing Furnace, in order to guarantee the lowest layer level variability.

**Keywords:** Pelletizing Process; Pelletizing Grill Oven; Control Strategy; FeedForWard control.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Carro de Grelha .....	17
<b>Figura 2</b> – Alimentação da grelha, com pelotas cruas e com pelotas de camada .....	18
<b>Figura 3</b> – Carro de grelha preenchido com pelotas cruas e queimadas .....	18
<b>Figura 4</b> – Diagrama de controle em realimentação negativa .....	20
<b>Figura 5</b> – Diagrama de controle antecipatório .....	20
<b>Figura 6</b> – Diagrama de controle em retroalimentação negativa com antecipatório .....	21
<b>Figura 7</b> – Bloco de função do controle antecipatório .....	24
<b>Figura 8</b> – Camada total x Viga do Forno .....	25
<b>Figura 9</b> – Controlador PID com FF .....	26
<b>Figura 10</b> – Análise de intervalo de tolerância .....	28
<b>Figura 11</b> – Carta I-AM Antes/ Depois .....	29
<b>Figura 12</b> – Comparação de Capacidade Antes/Depois .....	30
<b>Figura 13</b> – Gráfico Histograma .....	31
<b>Figura 14</b> – Gráfico Boxplot .....	31

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Variáveis da equação de velocidade de movimentação da grelha móvel .....	23
<b>Tabela 2</b> – Descrição de variáveis da função de transferência bloco PID .....	26
<b>Tabela 3</b> – Variáveis Cálculo Produção horaria liquida .....	32
<b>Tabela 4</b> – Diferença de capacidade de produção por estratégia de controle .....	32

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

DS – Desenvolvimento Sustentável

ITV – Instituto Tecnológico Vale

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

PID – Controle Proporcional, Integral e Derivativo

SP – Set Point (Valor desejável de controle de malha)

PV – Process Variable (Variável de Processo)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2 AMBIENTE DE PELOTIZAÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Pelotização .....</b>	<b>16</b>
2.1.1 Queima .....	16
2.1.1.1 Alimentação da Grelha .....	16
<b>3 REVISÃO SOBRE TECNICAS DE CONTROLE .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Tipos de Controles Automáticos (Malha Fechada) .....</b>	<b>19</b>
<b>4 INSTRUMENTOS E ACIONAMENTOS .....</b>	<b>21</b>
<b>5 METODOLOGIA .....</b>	<b>22</b>
<b>5.1 Coleta de Dados .....</b>	<b>22</b>
<b>5.2 Estratégias de Controle .....</b>	<b>22</b>
5.2.1 Estratégia de Controle por Vazão .....	22
5.2.2 Estratégia de Controle por Nível .....	25
<b>5.3 Método de Análise de Resultado .....</b>	<b>27</b>
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>28</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>33</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>34</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de pelletização que consiste basicamente na transformação de finos de minério de ferro em pelotas esféricas por aglomeração e endurecimento através de um processo térmico.

Podendo ser dividido em: moagem de insumos, prensagem de minério, mistura, pelotamento, classificação, endurecimento, peneiramento e estocagem.

A etapa de endurecimento se caracteriza pelo tratamento térmico da pelota de minério de ferro, dentro de um forno de grelha para que a pelota obtenha as características físicas e químicas necessárias para a produção do aço. Esta é a etapa principal em toda a cadeia de produção da pelota de minério de ferro, e possui os principais controles de temperatura, vazão, pressão e nível.

Dentre os vários controles existentes o controle de nível de camada destaca-se por interferir em todos os outros controles uma vez que o **fluxo de gases** dentro do forno é diretamente afetado pela variabilidade no nível de camada de pelotas dentro do forno, onde quanto maior é a variabilidade deste controle, maior as interferências no processo de queima.

O objetivo deste trabalho portanto é identificar e definir a estratégia de controle que garante a menor variabilidade no nível de camada da galha de pelletização da usina de São Luís.

## **2 AMBIENTE DE PELOTIZAÇÃO**

### **2.1 Pelotização**

Devido a necessidade de se aproveitar os finos de minério de ferro (granulometria menor que 0,15 mm) o processo de Pelotização foi criado no início do século XX, uma vez que este material era totalmente descartado devido a sua impossibilidade de utilização no processo siderúrgico, se tornando um resíduo indesejado (LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

As principais etapas do processo de Pelotização são: Estocagem/ Manuseio de minério, Prensagem, Mistura, Pelotamento, Queima, Peneiramento, Manuseio e Estocagem de Pelotas.

#### **2.1.1 Queima**

Para que as pelotas formadas no pelotamento possam resistir às operações de manuseio e transporte até o cliente, e para que suportem as pressões e os choques térmicos dentro dos reatores de redução para os quais se destinam as pelotas de minério de ferro, durante sua transformação em ferro, é necessário submetê-las a um tratamento térmico cuidadoso e bem balanceado, para proporcionar às mesmas, a resistência física e mecânica. Este tratamento é chamado de processo de queima das pelotas, o qual é realizado no forno de queima (LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

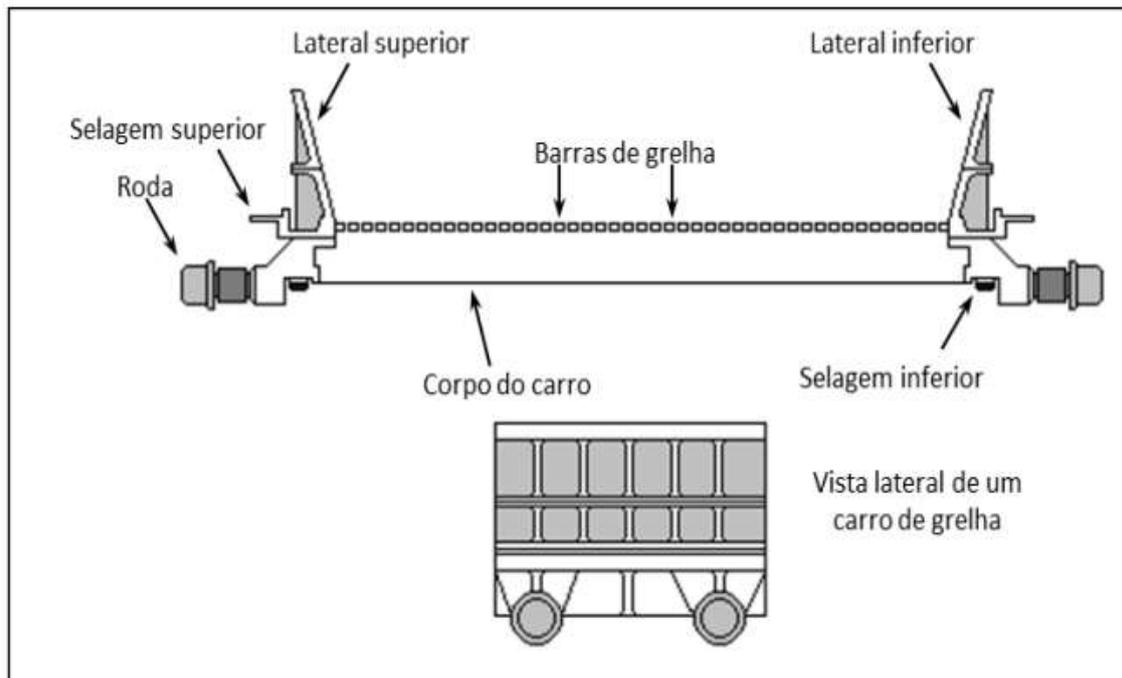
As pelotas cruas provenientes da etapa de pelotamento são classificadas na faixa granulométrica entre 18 mm e 8 mm de diâmetro, seguindo nas seguintes etapas dentro do processo de queima: – alimentação da grelha; – secagem ascendente (I e II) e secagem descendente; – pré-queima; – queima; – resfriamento (primário e secundário); – descarga (LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

##### **2.1.1.1 Alimentação da Grelha**

De acordo com Luz, França e Braga (2018), antes do carro de grelha (figura 1) ser preenchido totalmente com as pelotas cruas, recebe uma camada de pelotas que já foram queimadas e que retornaram da descarga do forno, conforme mostra a figura

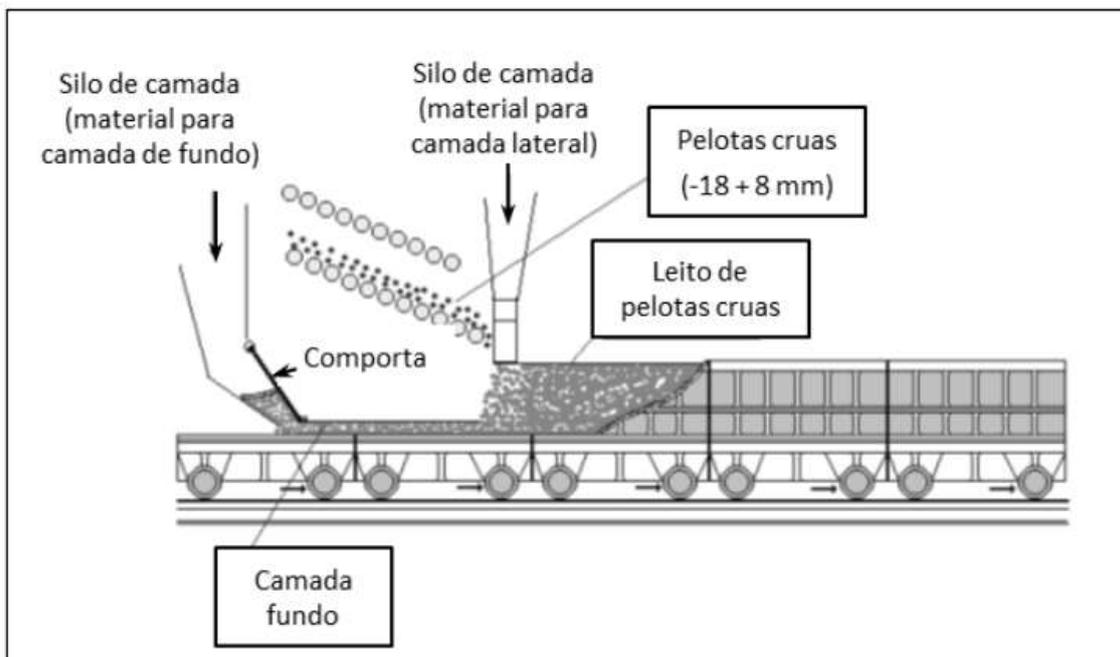
2, nomeada de camada de forramento, pelo preenchimento do fundo e lateral do carro com pelotas queimadas, para somente então ser completamente preenchido de pelotas cruas de forma a preencher todo o volume do carro de grelha como evidenciado na figura 3.

Figura 1: Carro de Grelha



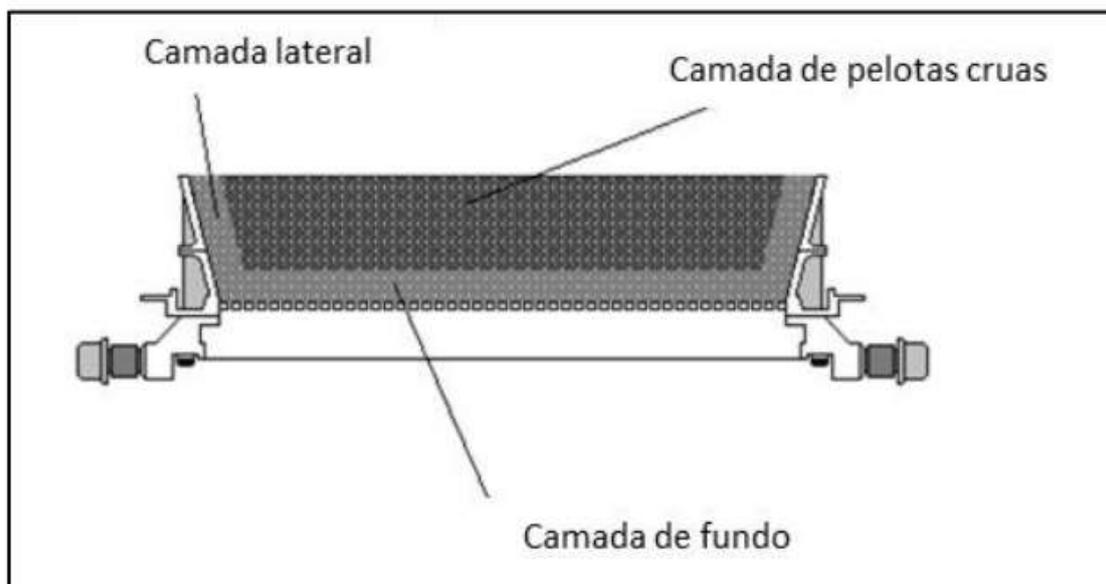
Legenda: Vista Frontal e Lateral Carro de Grelha.  
Fonte: CETEM (2018, p.697).

Figura 2: Alimentação da grelha, com pelotas cruas e com pelotas de camada



Legenda: Vista lateral alimentação de camada de pelotas  
Fonte: CETEM (2018, p.696).

Figura 3: Carro de grelha preenchido com pelotas cruas e queimadas



Legenda: Vista frontal do preenchimento das camadas de pelotas no carro de grelha.  
Fonte: CETEM (2018, p 697).

### 3 REVISÃO SOBRE CONTROLE DE PROCESSO

O termo *controle de processo* costuma ser utilizado para se referir a sistemas que tem por objetivo manter certas variáveis de uma planta industrial entre os seus limites Operacionais desejáveis (CAMPOS E TEXEIRA, 2010).

O controle de processo representa um papel muito vital no avanço da ciência e da tecnologia sendo necessário, na presença de distúrbios, para reduzir a diferença entre a saída de um sistema e a entrada de referência, podendo operar com base nesta diferença. Os avanços na teoria e na prática de controle propiciam meios para atingir o desempenho ótimo de sistemas dinâmicos. Um sistema de controle deve ser capaz de reduzir os erros a zero ou a algum valor muito pequeno (ALMEIDA, 2002).

Os sistemas de controle podem ser em malha aberta ou em malha fechada. Os sistemas de controle em malha aberta são simples e baratos, mas não compensam as possíveis variações internas ou externas inerentes a um processo industrial, uma vez que sua saída só é manipulada por uma atuação direta do operador. Para resolver esse problema usa-se o sistema de controle malha fechada ou com retroalimentação (*feedback*), onde surge a figura do *controlador* que compara o valor desejado (set point - SP) como o valor medido (variável de processo - PV) e se há um desvio entre estas variáveis ( $SP - PV \neq 0$ ) a saída (variável manipulada - MV) é manipulada de forma a eliminar o desvio ou erro, mantendo assim a PV o mais próximo possível do SP (CAMPOS E TEXEIRA, 2010).

Para controle em malha fechada o controlador PID tem um desempenho satisfatório sendo a técnica mais utilizada na indústria devido à sua simplicidade e custo computacional, logo a mais fácil de implementar em um caso real (Backes, Dutra e Gutierrez, 2019). Além disso, o controle em feedback é capaz de rejeitar qualquer perturbação medida ou não.

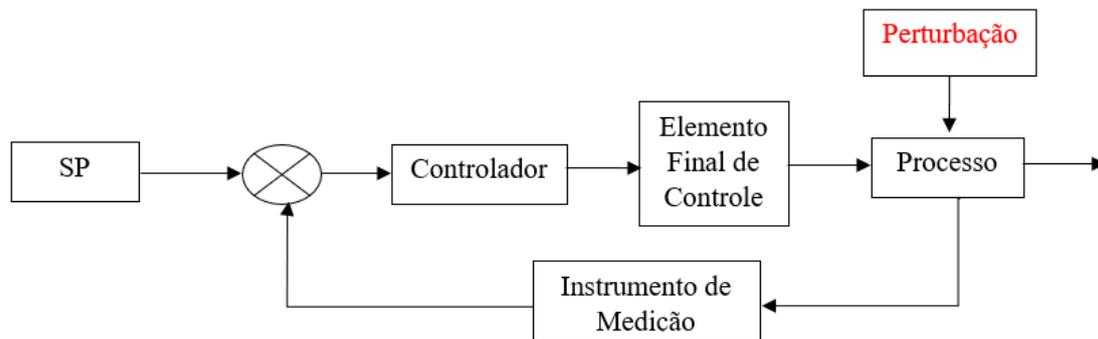
No entanto devido à alta variabilidade na alimentação de pelotas cruas em um forno de pelotização, faz-se necessário o uso do *controle feedforward* para se antecipar a estas variações de forma a não impactar o nível de camada total.

#### 3.1 Tipos de Controles Automáticos (Malha Fechada)

O controle automático pode ser realizado de duas maneiras:

Controle por retroalimentação (feedback): Neste sistema de controle, realiza-se a medida da variável controlada na saída do processo. A partir do valor obtido, o controlador atua para manter a variável de interesse no ponto fixo (set point) escolhido (Figura 4).

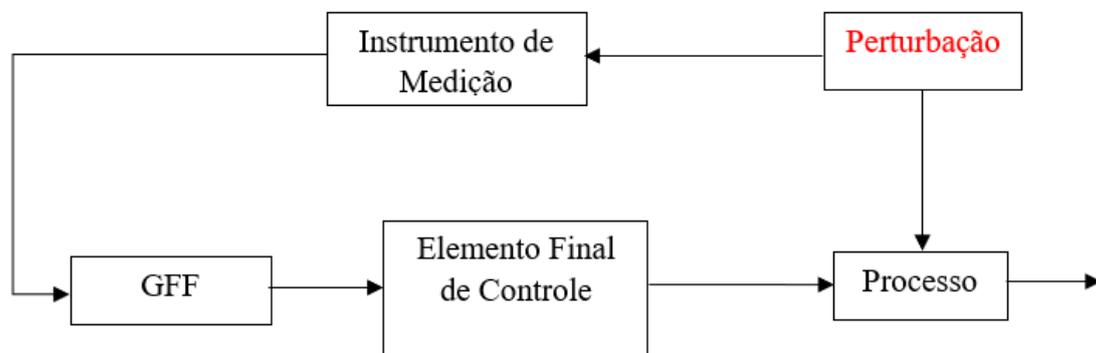
Figura 4: Diagrama de controle em realimentação negativa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Controle por Antecipação (*feedforward*): Neste sistema, a leitura da perturbação ocorre antes do processo a ser controlado. O princípio de funcionamento deste sistema é atuar antes que o efeito da perturbação apareça na variável de processo. Em um sistema de altura de camada de pelotas em um forno de pelletização essa perturbação é a vazão de alimentação da camada. Esse modelo pode ser representado pela Figura 5, onde GFF representa a forma de atuação do feedforward sobre o elemento final de controle.

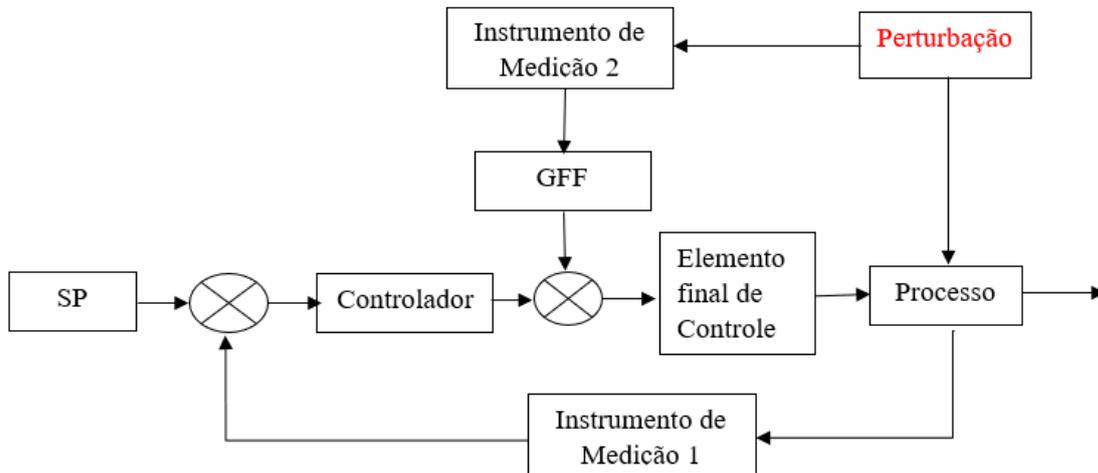
Figura 5: Diagrama de controle antecipatório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, o controle antecipatório não é aplicado de forma isolada na prática, mas combinando estas duas estratégias de controle automático. Assim temos o controle Feedback com feedforward, que pode ser representado pela Figura 6.

Figura 6: Diagrama de controle em retroalimentação negativa com antecipatório



Fonte: Elaborado pelo autor.

Atualmente o controlador mais utilizado nas indústrias e pela maioria dos fabricantes de controladores lógicos programáveis (CLP) é o Controlador PID que normalmente conta com o controle Feedback e Feedforward juntos.

#### 4 INSTRUMENTOS E ACIONAMENTOS

Para se conseguir realizar um bom controle, independente da estratégia de controle utilizada, se faz necessário ter confiabilidade nos instrumentos de medição das variáveis de processo e nos atuadores de manipulação do processo.

Para o controle de nível de prensa contamos com basicamente 2 sistemas de medição e um sistema de acionamento: Medição de nível da camada tota (PV), medição de vazão de alimentação da grelha (feedforward) e variação de velocidade do motor de acionamento da grelha como sistema de acionamento.

Como medida de nível de camada total utilizamos a média ou o maior valor de 3 instrumentos de ultrassom para medida de altura do nível de camada em centímetros que

possuem uma faixa de medição de 0 a 50 cm em 4 a 20 mA, este valor é usado como variável de processo pela malha de controle.

Como feedforward utilizamos a medição de vazão mássica oriunda de uma balança integradora que tem capacidade de medir vazão de 0 a 1400 Ton/h, instalada em uma dos transportadores de alimentação do forno de grelha. E para variável manipulada, o processo utiliza um inversor de frequência de motores para variar a velocidade de rotação do motor de acionamento da grelha móvel, onde essa rotação é convertida em velocidade linear da grelha com variação de 2,5 a 9,0 m/min pela malha de controle.

## **5 METODOLOGIA**

### **5.1 Coleta de Dados**

A coleta de dados para realizar o estudo foi oriunda de uma indústria de pelotização localizada em São Luís – MA, pertencente a maior mineradora do Brasil. Os dados referentes ao sistema de controle de Nível de Camada do Forno de Pelotização foram coletados diretamente do sistema de controle da planta com o Engenheiro de Automação responsável.

Para efeito de análise de resultados, foi realizado um levantamento histórico da Variável de Processo

### **5.2 Estratégias de Controle**

Para guiar o estudo chamaremos as estratégias de controle a serem confrontadas da seguinte forma: Estratégia de Controle por Vazão e Estratégia de Controle por Nível.

#### **5.2.1 Estratégias de Controle por Vazão**

Esta estratégia era utilizada, quando foi dado início ao estudo, na Usina de Pelotização de São Luís onde o controle antecipatório tem uma atuação mais relevante no controle de nível de camada e o controle feedback atua de forma a corrigir pequenos

desvios do processo, reduzindo desta forma a atuação deste controle no sistema. A função de transferência do controle feedforward, tem como objetivo definir a velocidade de movimentação da grelha móvel e é descrita pela equação:

$$V = CCG * PHL / (60 * ACG * ((Ht - Hf) / 1000)) / D,$$

onde as variáveis V, CCG, PL, ACG, Hf, Ht e D, são definidas pela Tabela 1

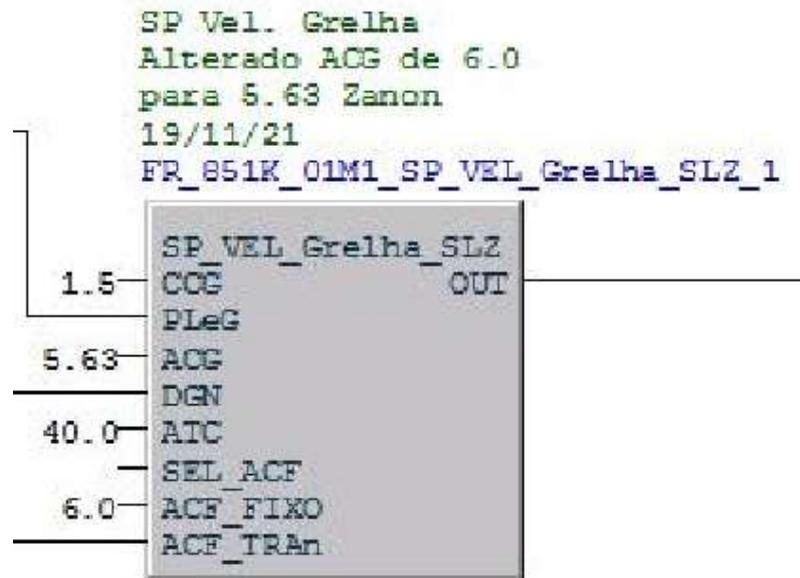
Tabela 1: Variáveis da equação de velocidade de movimentação da grelha móvel.

<b>Variável</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade de Medida</b>
V	Velocidade da Grelha	m/min
CCG	Comprimento do Carro de Grelha	m
PHL	Produção Horaria Líquida de Pelotas Cruas	t/h
ACG	Área do Carro de Grelha	m <sup>2</sup>
Ht	Altura Total do Leito de Pelotas	mm
Hf	Altura da Camada de Forramento	mm
D	Densidade à Granel	t/m <sup>3</sup>

Fonte: Elaboração própria.

No entanto este controle foi desenvolvido de uma forma não muito usual, pois não há muito referencial teórico para estudo de tal estratégia, além do que controle antecipatório atua quase de forma isolada no sistema, e para se alterar o controle se faz necessário um profundo conhecimento do processo, das características mecânicas e de lógica, uma vez que toda alteração ou ajuste tem que ser feito diretamente no bloco de função que possui encapsulado a função de transferência do controle feedforward. Outra dificuldade é com relação aos parâmetros de entrada e saída do bloco de função, pois estes possuem valores fixos na lógica, inclusive o SP, chamado de ACT na Figura 7, dependendo da atuação do profissional da automação para realizar qualquer alteração de parâmetro, reduzindo assim a liberdade da operação de atuar no processo de controle de nível da camada, gerando assim impactos na produção e qualidade da pelota de minério de ferro.

Figura 7: Bloco de função do controle antecipatório

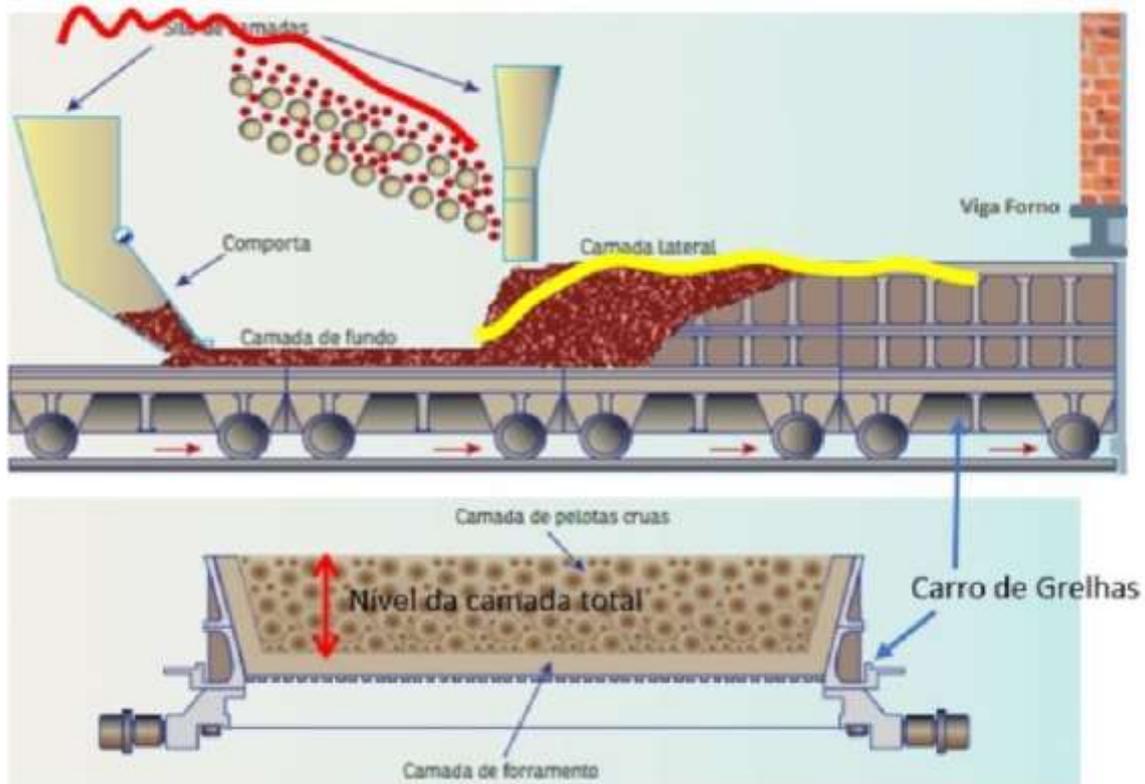


Legenda: Bloco lógico com função de transferência do controle antecipatório

Fonte: Lógica de controle.

Outra desvantagem do controle por vazão é o fato do controle feedback não estar vinculado ao controle antecipatório e com isso o operador pode definir um valor de SP do controle PID diferente do SP do controle feedforward que se encontra dentro da lógica, gerando assim uma maior instabilidade no processo, uma vez que o controle antecipatório está buscando um SP diferente do bloco PID, em muitos dos casos levando a malha de controle a uma oscilação cada vez mais ampla em torno do SP até atingir o nível máximo de camada (50 cm) fazendo com que as pelotas alcancem a viga transversal de entrada do forno, conforme figura 8, gerando uma grande quantidade de finos de minério de ferro na região do início do forno e com isso um incidente ambiental.

Figura 8: Camada total x Viga do Forno



Fonte: Conexão Mineral (2022, <https://www.conexaomineral.com.br/noticia/2589/samarco-zera-emissoes-atmosfericas-na-troca-de-carros-de-grelha.html>).

### 5.2.2 Estratégia de Controle por Nível

Estratégia implementada no decorrer do trabalho seguindo a literatura de controle mais conhecida através do controlador PID que possibilita utilizar o controle Feedback junto com o controle feedforward conforme Figura 6, onde o nível de atuação de cada controle é definido pelos ganhos definidos no módulo de controle pelo profissional da automação, seguindo as funções de transferência do bloco PID e feedforward disponíveis no manual do fabricante.

Função de transferência bloco PID:

$$Out = G \times ((\beta \times Sp - Pv) + \frac{1}{Ti} \times \int (Sp - Pv)dt + Td \times \frac{d}{dt} FilterOf(-Pv, Tfil))$$

Tabela 2: Descrição de variáveis da função de transferência bloco PID

Variável	Descrição
Sp	Setpoint
Pv	Variável de Processo
G	$G = \text{Gain} \times (\text{OutRange}) / (\text{PvRange})$
Gain	Ganho Proporcional
OutRange	A escala da saída do bloco PID (OUT máximo – OUT mínimo)
PvRange	A escala da PV do bloco PID (PV máximo – PV mínimo)
$\beta$	Peso do SP sobre o problema servo
Ti	Tempo Integral
Td	Tempo Derivativo
Tfil	Tempo do Filtro Passa-baixo para o derivativo
FilterOf (x,y)	x é enviada através de um filtro passa-baixo. O tempo de filtro é igual a y.
Out	Saída do controlador PID

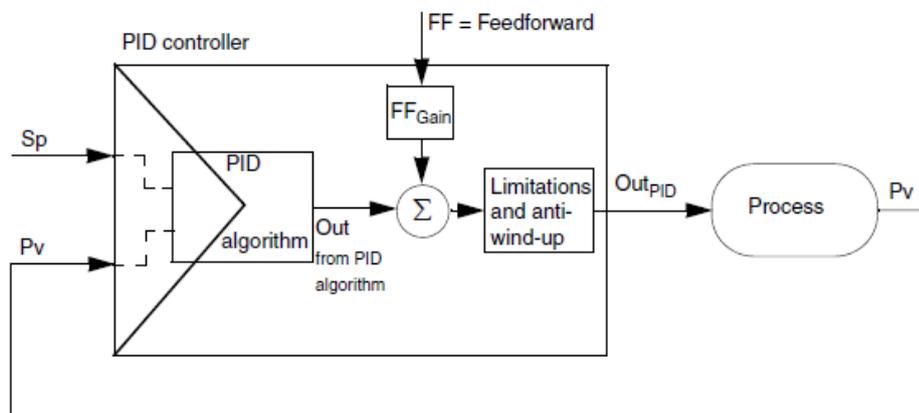
Fonte 1: Elaboração própria.

Função de transferência feedforward:

$$Out_{PID} = Out_{fromPID\ algorithm} + FF_{Gain} \times FF$$

Com a implantação desta estratégia de controle temos os controles feedback e feedforward integrados em um único bloco de função conforme Figura 9.

Figura 9: Controlador PID com FF



Legenda: Bloco de controle PID com FF do sistema 800XA da ABB

Fonte: System 800xA Control - Binary and Analog Handling V6.0 (p. 185).

Isso garante ao controle um único valor de SP definido pela operação do sistema pela tela do supervisor de forma que tanto o controle feedforward como o controle PID Feedback estejam buscando a mesma referência.

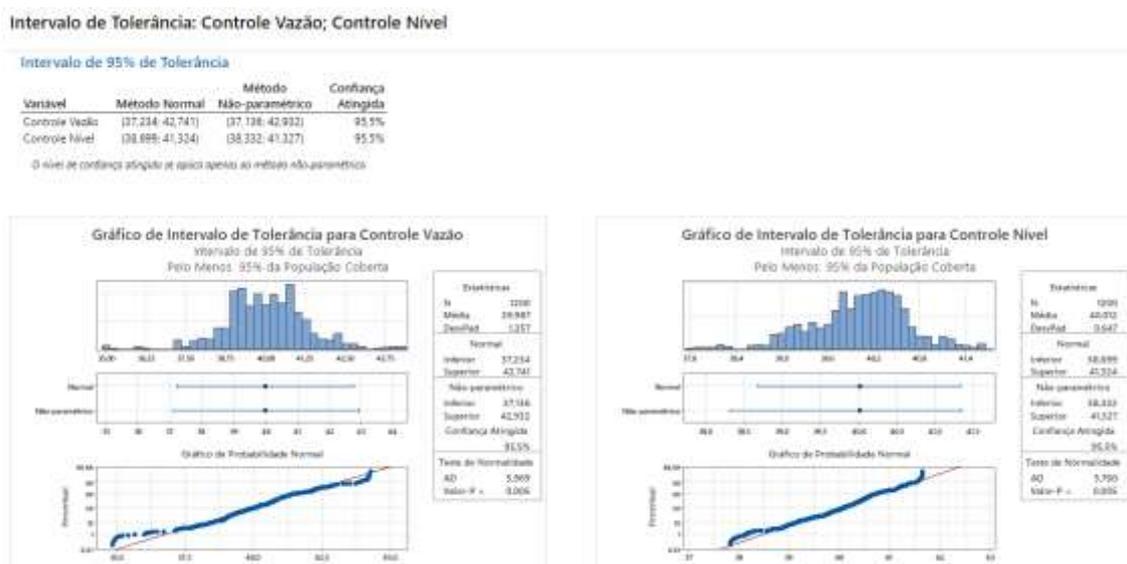
### **5.3 Método de Análise de Resultado**

Para efeito de análise de resultados de forma a possibilitar a comparação dos dois métodos de controles aplicados (Vazão e Nível), foram utilizados o software *Minitab Statistical*, com as ferramentas de análise de dados: Carta I-AM Antes / Depois, Histograma, Boxplot, Comparação de Capacidade Antes e Depois e Intervalo de Tolerância, com uma base histórica de dois meses de operação para cada estratégia de controle, que gerou 1.200 de amostras para cada controle aplicado.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados coletados foram submetidos a vários métodos de análises estatísticas para efeito de validação dos dados e comparação entre as amostras com o Controle por Vazão e o Controle por Nível, com isto foi possível constatar através do teste de Intervalo de Tolerância uma Confiança Atingida de 95,5% para os 2 conjuntos de amostras (Figura 10).

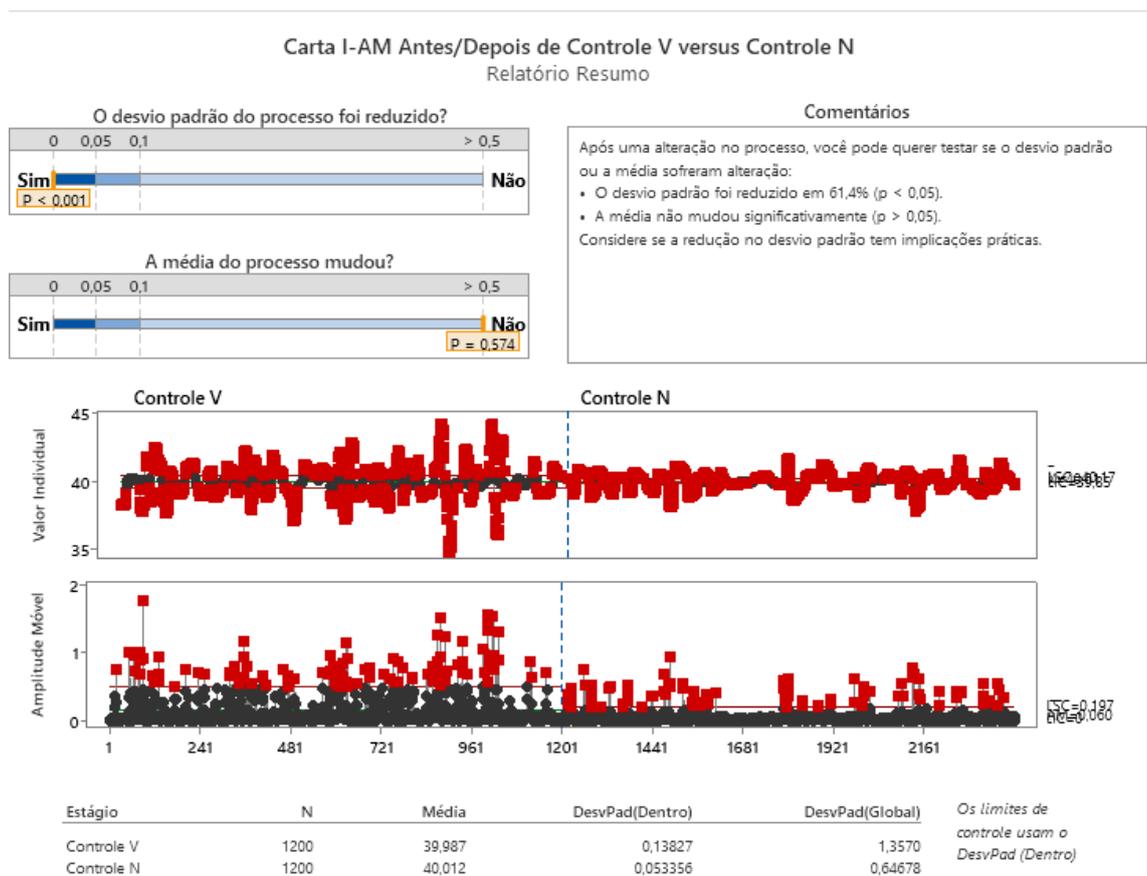
Figura 10: Análise de intervalo de tolerância



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após constatar que as amostras eram confiáveis e que apresentavam uma distribuição normal, utilizou-se uma análise por Carta I-AM Antes/Depois com o fim de verificar se houve mudanças significativas no controle e no processo produtivo, sendo possível detectar uma redução de 61,4% no desvio padrão do processo sem alterar de forma significativa a média da variável manipulada, sendo desvio padrão no Controle por Vazão é de 1,357 mm e no Controle de Nível é de apenas 0,647 mm aproximadamente (Figura 11).

Figura 11: Carta I-AM Antes/ Depois

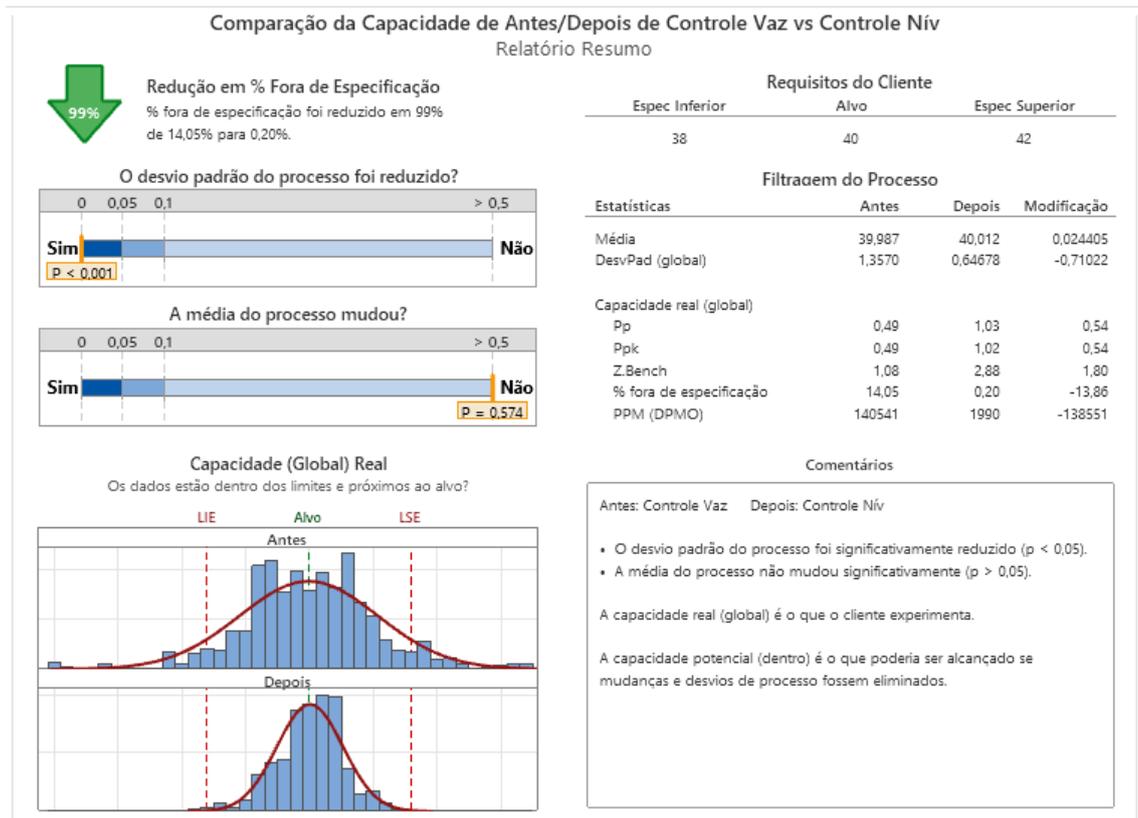


Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro resultado alcançado foi a capacidade do controle em manter a Variável de Processo, os mais próximos possível do valor desejável de controle do processo que é de 40 cm com um limite inferior a 38 cm e o limite superior de 42 cm. Para realizar a comparação de qual estratégia de controle atenderia de forma mais eficaz a esses parâmetros, foram utilizados a Comparação de Capacidade, onde é possível definir uma Valor Alvo, Especificação Inferior e Superior da variável analisada, sendo possível constatar uma redução de 99% dos valores fora destes limites, pois no Controle por Vazão 14,05% das amostras estavam fora dos limites especificados e apenas 0,20% das amostras do Controle por Nível ultrapassaram os limites especificados (Figura 12).

Figura 12: Comparação de Capacidade Antes/Depois

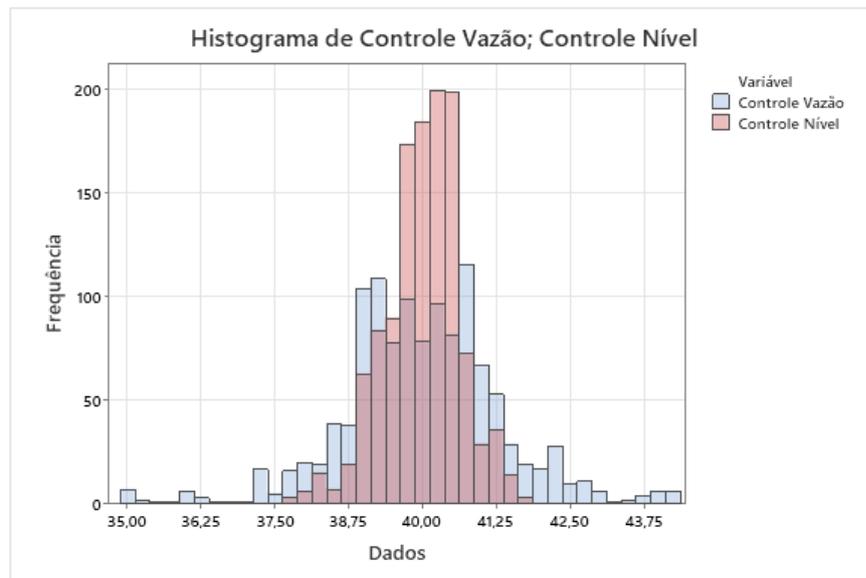
### Comparação da Capacidade de Antes/Depois de Controle Vaz vs Controle Nív



Fonte: Elaborado pelo autor.

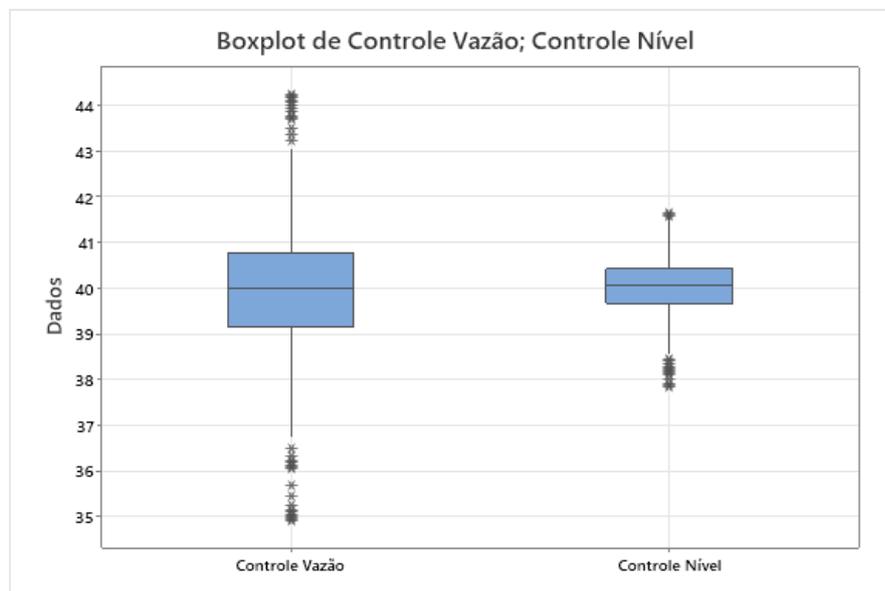
Após constatar uma redução significativa no desvio padrão e porcentagem de amostras fora dos valores especificados de processo, foi aplicado uma análise por gráficos de Histograma (Figura 13) e Boxplot (Figura14) para avaliar a redução da variabilidade da PV em relação ao SP .

Figura 13: Gráfico Histograma



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14: Gráfico Boxplot



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após constatação da redução da variabilidade obtida através do processo de controle de nível da altura total do leito de pelotas no carro grelha do forno, com a estratégia de Controle por Nível foi possível realizar um aumento da camada total de 40 cm para 42 cm sem aumentar o risco de emissão de particulado em função da raspagem do carro ao atingir a viga. Este aumento de 5% no valor da camada total possibilita um

aumento da capacidade de produção no forno de Grelha da Usina de Pelotização, onde o trabalho foi desenvolvido, na ordem de 438.306 Toneladas/ano, segundo cálculo de Produção Horária Líquida:

$$PHL = ((60 * ACG * ((Ht - Hf) / 1000)) * D) / V / CCG$$

Sendo as mesmas variáveis apresentadas da Tabela 1, e seus respectivos valores definidos na Tabela 3

Tabela 3: Variáveis Cálculo Produção horaria liquida

Variavel	Controle Vazão	Controle Nível
<b>CCG</b>	1,5 m	1,5 m
<b>PHL</b>	851 t/h	901 t/h
<b>ACG</b>	5,63 m	5,63 m
<b>Ht</b>	400 mm	420 mm
<b>Hf</b>	60 mm	60 mm
<b>D</b>	2,1 T/m <sup>3</sup>	2,1 T/m <sup>3</sup>
<b>V</b>	5,29 m/min	5,29 m/min

Legenda: Compara os valores de PHL das duas estratégias de controle.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim é possível calcular os aumentos de capacidades de produção diários e anual conforme Tabela 4.

Tabela 4: Diferença de capacidade de produção por estratégia de controle

	PHL (Ton/h)	Capacidade Dia (Ton)	Capacidade Ano (Ton)
<b>Nível</b>	901	21.624	7.889.509
<b>Vazão</b>	851	20.414	7.451.203
<b>Diferença</b>	50	1.201	438.306

Fonte 2: Elaborado pelo autor.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas análises de comparação entre as duas estratégias de controle implementadas, o controle PID com controle antecipatório para controle do Nível de camada de pelotas se mostrou mais eficiente, além de ser mais simples de ser implementado. Devido a facilidade de se encontrar literatura sobre este tipo de controle e sua vasta utilização nas indústrias, sendo este também um tipo de controle que permite ajustes de forma simplificada pelo engenheiro responsável pelo processo, além de aumentar o grau de liberdade da operação em escolher qual o SP para diferentes circunstâncias de toda a cadeia do processo produtivo da pelotização.

Para trabalhos futuros pode-se buscar um ajuste automático do SP de altura da camada de acordo com a PHL desejada pela operação de maneira a manter a velocidade de deslocamento dos carros de grelha constante, para manter o tempo de permanência do processo de queima constante, garantido assim uma maior uniformidade na qualidade do produto.

## REFERÊNCIAS

CAMPOS, Mario Cesar M. Massa; TEXEIRA, Herbert C. G. (2010). **Controles Típicos de equipamentos e processos industriais**, 2ª edição, Ed. Blucher

LUZ, Adão Benvindo; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida (2018). **Tratamento de Minérios**, 6ª edição, CETEM – Centro de Tecnologia Mineral.

OGATA, Katsuhiko (2010). **Engenharia de Controle Moderno**, 4ª edição, Ed. Pearson.

System 800xA Control - Binary and Analog Handling V6.0, **manual do Sistema de Controle ABB**.

ALMEIDA, A. C. R. **Simulação e controle de um sistema de suspensão simplificado** - Dissertação (Mestrado em Matemática) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

BACKES, I.; DUTRA, D. A. A.; GUTIERREZ, J. C. H. **Técnicas de controle para suspensão ativa: Um comparativo do desempenho dos controladores PID** - Congresso Brasileiro de Instrumentação, Sistema e Automação, 2019