

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
Curso de Especialização em Automação Industrial - CEAI

Cristiano Citi Ottoni

**MODELAGEM E APLICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO DE TEMPO MORTO PARA
MALHA DE CONTROLE DE TAXA DE MINÉRIO DE FERRO EM UM
ALIMENTADOR DE SAPATAS**

**Belo Horizonte,
2016**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
Curso de Especialização em Automação Industrial - CEAI

Cristiano Citi Ottoni

**MODELAGEM E APLICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO DE TEMPO MORTO PARA
MALHA DE CONTROLE DE TAXA DE MINÉRIO DE FERRO EM UM
ALIMENTADOR DE SAPATAS**

Monografia apresentada ao curso de Especialização em Automação Industrial da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Automação Industrial.

Orientador: Prof. Bruno Otávio Soares
Teixeira.

**Belo Horizonte,
2016**

Dedico esta monografia a todas as pessoas que acompanharam e participaram nesses dois anos de forma direta ou indiretamente de todos os momentos, me apoiaram e me ajudaram a superar os momentos difíceis enfrentados nestes anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda força em mim depositado nestes anos de estudo, pois não foi fácil chegar até aqui.

Aos meus pais pelo apoio e amor incondicional que com muito orgulho tenho como exemplo de vida. Aos meus irmãos e minha esposa pelo carinho e atenção.

Agradeço a meus colegas de classe, por compartilharem comigo vários momentos nestes anos, tristezas, alegrias, momentos que ficarão para sempre em minha memória.

Ao professor Bruno Otávio Soares Teixeira, pela paciência e por me conduzir no desenvolvimento deste trabalho.

Enfim, para todos que contribuíram de forma direta e indiretamente para o enriquecimento deste trabalho.

RESUMO

Nas empresas de extração de minério, o controle mássico em cada unidade de tratamento de minério é indispensável. A partir dos dados disponibilizados por instrumentos instalados em campo, o controle e gerenciamento da planta pode ser feito por meio de controladores industriais. Os controladores lógicos são capazes de interpretar o descritivo funcional do processo, tomando decisões automáticas para efetuar comandos em equipamentos e atuadores. Dentre os algoritmos de programação dos controladores industriais, existem lógicas específicas para controle de processo. Essas lógicas incluem a utilização de controladores PID (proporcional, integral e derivativo), que em várias aplicações podem ser utilizados somente o controle proporcional e integral (PI). A sintonia de controladores requer um conhecimento prévio da dinâmica do processo a ser controlado, porém vários fatores podem dificultar a estabilidade da malha de controle. Para os casos em que o atraso puro de tempo do processo seja dominante, novas estratégias de controle devem ser elaboradas. Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de compensação de tempo morto baseado no preditor de Smith em uma malha de controle de vazão mássica, onde a variável manipulada é a velocidade de um Alimentador de Sapatas. Para elaboração da estrutura de controle com o compensador de tempo morto foram utilizadas técnicas de identificação de sistemas para representação do processo. Foram coletados os sinais de saída da malha de controle e da variável do processo para estimação dos parâmetros do modelo. O método de mínimos quadrados foi utilizado para estimar os parâmetros do modelo matemático. Após o resultado dos ensaios, a estrutura de controle considerando o preditor de Smith foi implementada no PLC (*Programable Logic Control*). Pelos resultados obtidos, conclui-se que o preditor de Smith melhora o desempenho da malha de controle e elimina o *overshoot* da resposta transitória do processo. Dessa forma, a sintonia da malha de controle permite uma estratégia desconsiderando a existência do atraso puro de tempo do sistema.

Palavras-chave: Compensador de tempo morto, Preditor de Smith, Malha de controle, Controlador PI, Técnicas de identificação de sistemas, Modelagem.

Abstract

In the ore extraction companies, the mass control in each ore treatment unit is indispensable. From the data provided by instruments installed in the field, the control and management of the plant can be done through industrial controllers. Logical controllers are able to interpret the functional descriptive of the process, making automatic decisions to make commands on equipment and actuators. Among the programming algorithms of the industrial controllers, there are specific logics for process control. These logics include the use of PID controllers (proportional, integral and derivative), that in several applications only proportional and integral control (PI) can be used. Controller tuning requires prior knowledge of the dynamics of the process to be controlled, but several factors may hamper the stability of the control loop. For those cases where the pure process time lag is dominant, new control strategies must be developed. This work describes the development of a dead time compensation system based on Smith's predictor in a mass flow control mesh, where the manipulated variable is the speed of a Shoe Feeder. For the elaboration of the control structure with the dead time compensator, techniques of system identification were used to represent the process. The output signals of the control mesh and the process variable were collected to estimate the parameters of the model. The least squares method was used to estimate the parameters of the mathematical model. After the test results, the control structure considering Smith's predictor was implemented in the PLC (Programmable Logic Control). From the results obtained, it is concluded that Smith's predictor improves the performance of the control mesh and eliminates the overshoot of the transient response of the process. In this way, the tuning of the control mesh allows a strategy disregarding the existence of the pure time delay of the system.

Keywords: Dead time compensator, Smith predictor, Control mesh, PI controller, System identification techniques, Modeling.

Lista de Figuras

Figura 1 - Tela do supervisor com o sinótico do setor de cominuição mostrando cada processo unitário até o ponto de medição da taxa de minério desse processo. (1) Ponto de basculamento de minério; (2) Silo de armazenamento de minério; (3) Alimentador de Sapatas; (4) Peneira Industrial; (5) Britador; (6) Correia Transportadora. Fonte: Aplicativo da empresa.	8
Figura 2 - Caminhão fora de estrada modelo 793F, utilizado no processo de transporte de carga. Fonte: WWW.CAT.COM, 2016.....	9
Figura 3 - Fluxograma do ciclo de carregamento e transporte de minério na mina mostrando as etapas que compõem esse processo. (1) Ponto de carregamento do caminhão; (2) Direcionamento do caminhão; (3) Ponto de chegada para basculamento do caminhão; (4) Direcionamento do caminhão; (5) Chegada do caminhão para carregamento. Fonte: Aplicativo da empresa.	10
Figura 4 - Exemplo de Alimentador de Sapatas com as mesmas características do equipamento sob estudo nesse trabalho. Fonte: WWW.METSO.COM.BR, 2016.....	12
Figura 5 - Exemplo de Peneira Vibratória similar ao equipamento utilizado no processo de cominuição. Fonte: WWW.VIBRATESCREEN.COM.BR, 2016.....	13
Figura 6 - Exemplo de Britador Giratório utilizado no tipo de processo de cominuição em estudo. Fonte: WWW.METALICA.COM.BR, 2016.....	14
Figura 7 - Exemplo de Correia Transportadora com as mesmas características de transporte de minério correspondente ao processo em análise. Fonte: http://ore-beneficiation.com.br/ , 2016.....	15
Figura 8 - Tela do supervisor e tela da malha de controle que é utilizado para efetuar comandos e acompanhar o desempenho da malha. Fonte: Aplicativo da empresa.	17
Figura 9 - Tela do supervisor com a malha de controle FICTC1211AA01 usada como interface para acompanhamento e comandos do técnico de sala de controle. Fonte: Aplicativo da empresa.	18
Figura 10 - Estrutura do preditor de Smith para compensação de tempo morto na resposta do sistema.	26
Figura 11 – Estrutura IMC com modelo da planta incorporado ao esquema do controlador...28	
Figura 12 - Representação dos dados da malha de controle FICTC1211AA01 amostrados para análise dos resultados.	31
Figura 13 - Resposta da entrada ao degrau na malha de controle FICTC1211AA01 com os dados normalizados para avaliar a estrutura do modelo matemático.	32
Figura 14 - Correlação entre o CO e PV da malha de controle FICTC1211AA01 usado para avaliar o atraso puro de tempo do sistema.....	33
Figura 15 - Simulação um passo à frente, simulação livre com modelo discreto ARX e simulação livre com modelo contínuo usando uma função de transferência representando a malha de controle FICTC1211AA01.	35
Figura 16 - Testes de Validação dos modelos matemático da malha de controle FICTC1211AA01, onde é possível observar a similaridade entre os modelos com os dados de validação.....	35
Figura 17 - Comparação entre o sinal gerado pelo modelo implementado no PLC com a variável do processo PV, com intuito de avaliar a correlação entre os dados.	36
Figura 18 - Diagrama de bloco da malha de controle FICTC1211AA01 antes da implementação do preditor de Smith.....	37
Figura 19 - Diagrama de bloco proposto para a malha de controle FICTC1211AA01 com preditor de Smith como compensador de tempo morto.....	38

Figura 20 - Simulação de comparação entre as respostas do sistema com e sem o preditor de Smith para entrada ao degrau.	39
Figura 21 - Comparação entre os dados reais do sistema com a resposta do modelo de predição.	40
Figura 22 - Comparação entre os dados reais do sistema com a resposta do modelo de predição.	41
Figura 23 – Estratégia de controle da malha FICTC1211AA01 antes da implementação do preditor de Smith. (1) Malha de controle PID de vazão mássica (t/h) com atuação sobre a velocidade do alimentador. A definição do SP de vazão mássica é feita pelo operador de sala de controle. (2) Malha de controle PID de nível (%) do silo do alimentador. Foi implementada como malha de segurança segundo a estratégia <i>Override</i> , onde em momentos de nível baixo, a malha assume o controle sobre a velocidade do alimentador buscando reduzir paradas por intertravamento de nível muito baixo.	42
Figura 24 – Proposta da estratégia de controle da malha FICTC1211AA01 com o preditor de Smith. Preditor Smith: modelo matemático de compensação de tempo morto representativo da dinâmica do processo. A variável de processo (vazão mássica TC1211AA01) é sobrescrita pelo resultado do modelo compensando o atraso da leitura da taxa na balança WIT1211AA500 na resposta transitória da malha.	43
Figura 25 – Resposta da malha de controle sem o preditor de Smith representando um ponto de falha no controle da taxa de minério no processo de cominuição.	44
Figura 26 – Resposta transitória da malha FICTC1211AA01 representando a parada do equipamento como proteção por taxa alta de minério.	45
Figura 27 – Resposta da malha de controle FICTC1211AA01 com a implementação do preditor de Smith demonstrando a eliminação do <i>overshoot</i> na resposta do sistema e as variações no sinal de entrada do processo (MV).	46
Figura 28 – Análise de variabilidade da malha FICTC1211AA01 antes e depois da implementação do preditor de Smith no PLC.	47
Figura 29 – Resposta da malha de controle FICTC1211AA01 com uma nova sintonia utilizando o <i>PlantTriage</i> no sistema com compensador de tempo morto.	49
Figura 30 – Comparativo de desempenho entre as respostas da malha de controle FICTC1211AA01 antes e depois da sintonia após implementação do preditor de Smith.	49
Figura 31 – Análise de capacidade dos dados da malha de controle FICTC1211AA01 com o preditor de Smith somente em regime permanente antes da sintonia.	50
Figura 32 - Análise de capacidade dos dados da malha de controle FICTC1211AA01 com o preditor de Smith somente em regime permanente antes da sintonia.	51

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Controle pelo nível do silo.....	11
Tabela 2 - Lista de identificação dos equipamentos por TAG	16
Tabela 3 - Identificação das variáveis da malha de controle FICTC1211AA01	18
Tabela 4 – Ajuste dos parâmetros do controlador após implantação do preditor de Smith	48

NOMENCLATURA E SIMBOLOS

PV	Variável de processo
MV	Variável manipulada
CO	Saída do Controlador
SP	<i>Set Point</i>
PID	Controlador Proporcional Integral e Derivativo
PI	Controlador Proporcional Integral
Ti	Tempo integral do controlador em segundos
θ	Parâmetros de um modelo ARX
ψ	Vetor de regressores
τ	Constante de tempo do processo de primeira ordem
K	Ganho proporcional
$r_x(k)$	Função de auto correlação em um sinal de entrada do sistema
$r_{xy}(k)$	Função de correlação cruzada
ψ_{yu}	Matriz de regressores de um modelo ARX
τd	Atraso puro de tempo de um modelo ARX
Kn	Ganho proporcional do modelo
τn	Constante de tempo do modelo do processo de primeira ordem
Ln	Atraso puro de tempo do modelo
PLC	Controlador lógico programável
IMC	<i>Internal Model Control</i>
ROM	<i>Run Of Mine Ore</i>

Sumário

1 INTRODUÇÃO	2
1.1 Motivação	2
1.2 Justificativa	3
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Estrutura do texto.....	6
2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO.....	7
2.1 Visão geral da instalação de britagem	7
2.1.1 Etapa 1 – Ponto de basculamento de material.....	9
2.1.2 Etapa 2 – Silo de entrada.....	10
2.1.3 Etapa 3 – Alimentador de Sapatas.....	11
2.1.4 Etapa 4 – Peneira Vibratória	12
2.1.5 Etapa 5 – Britador	13
2.1.6 Etapa 6 – Correia Transportadora	14
2.1.7 Informações adicionais.....	16
2.2 Controle da taxa de alimentação da britagem complementar	16
3 METODOLOGIA.....	20
3.1 Técnicas de identificação de sistemas com tempo morto	20
3.1.1 Etapas para identificação e modelagem de sistemas.....	21
3.1.2 Estimador de mínimos quadrados	22
3.2 Método de compensação de tempo morto em sistemas de controle	25
3.2.1 Preditor de Smith.....	26
4 RESULTADOS	30
4.1 Modelagem do sistema da variação de taxa de minério de ferro no processo de cominuição.....	30
4.1.1 Aplicação do modelo no PLC.....	36
4.2 Malha de controle com compensador de tempo morto	37
4.2.1 Análise da resposta no domínio do tempo.....	39
4.2.2 Aplicação do modelo do preditor de Smith na malha de controle FIC1211AA01.....	41
4.2.3 Avaliação da sintonia da malha de controle FIC1211AA01	48
5 CONCLUSÃO.....	52
5.1 Trabalhos Futuros	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

As empresas utilizam de recursos computacionais para controlar o processo na disputa de um mercado em um complexo e competitivo ambiente tecnológico. Tendo em vista esse fato, cada vez mais, a automação industrial torna-se imprescindível para a sobrevivência dessas organizações. Por meio de sistemas de controle automatizado, essas empresas buscam inovar os processos produtivos com objetivos de reduzir custos e aumentar a qualidade de seus produtos ou serviços.

Dentre os recursos da automação industrial, os sistemas para controle de processos desempenham um papel importante para o aumento da produtividade da empresa. Porém, para que isso seja possível, as instalações devem ser instrumentadas de forma a representar as variáveis do processo. Como afirma Alves (2005), para controlar um processo é necessário um sensor, um controlador e um elemento final de controle. O controlador, baseado nas diferenças entre o SP (*setpoint*) e o valor do sensor produz um sinal apropriado para controlar a MV (variável manipulada). O sensor representa a PV (variável do processo) e a MV representa o elemento final de controle.

A instalação de sistemas de automação que precisam de infraestrutura e dispositivos como sensores, redes industriais e instrumentação em campo nem sempre é possível. Em alguns casos, essas instalações não são feitas nas melhores condições de funcionamento. Isso impacta nos dados disponibilizados pela instrumentação, que são necessários para o gerenciamento e controle do processo. Na diversidade dos impactos causados pela deficiência da instalação dos instrumentos em campo, o controle do processo sofre pelo fenômeno de retardo da resposta no transporte de massa. Essa situação ocorre quando o gerador do evento está deslocado do ponto de medição. Neste caso, a sintonia da malha de controle tem que considerar o atraso na dinâmica desse processo.

Quando o processo tem um atraso significativo, o desempenho da malha de controle pode ser melhorado utilizando um compensador de tempo morto. A primeira proposta como solução de sistemas com tempo morto foi apresentada por Otto Smith em 1957. O preditor de Smith

propõe um compensador de tempo morto num sistema em malha fechada, dessa forma, o preditor antecipa a resposta do sistema. O preditor de Smith utiliza um modelo matemático que representa o processo estudado, cujos parâmetros podem ser definidos a partir de técnicas de modelagem. A ordem da função escolhida para o preditor depende da análise da resposta do processo.

O uso de modelos e simulações foi intensificado com o crescimento exponencial da capacidade de processamento dos computadores digitais. O modelo é a representação do conhecimento para o estudo do comportamento de sistemas complexos e a simulação é a estratégia para atingir o melhor modelo que representa o sistema. Os parâmetros dos modelos podem ser definidos a partir de técnicas de identificação de sistemas, que analisam a dinâmica do processo.

1.2 Justificativa

Ao longo dos anos, o uso da tecnologia tem sido um dos fatores diferenciais na competitividade entre as empresas. A instalação de instrumentos para representar as variáveis do processo ajuda no controle e aumenta o conhecimento da dinâmica da planta. Dessa forma, a tomada de decisão passa a ser mais assertiva e com o auxílio de recursos computacionais, as decisões passam a ser mais rápidas e automáticas. Segundo Alves (2005), o controlador lógico programável (PLC) é o principal dispositivo de controle industrial da atualidade, devido a sua capacidade de manipular números e executar algoritmos PID.

De acordo com Alves (2005), muitos homens eram necessários para manter o controle de diversas variáveis existentes nas plantas industriais. Devido ao custo elevado e com o avanço tecnológico dos instrumentos e equipamentos para controle começaram os investimentos em métodos de identificação, otimização, controle avançado e controle estatístico de processo.

Os recursos computacionais, como softwares e hardwares industriais juntamente com a instrumentação instalada na planta são recursos usados para elaborar um modelo matemático que representa a dinâmica da planta. Isso é possível com a programação de algoritmos, lógicas matemáticas e técnicas de identificação de sistemas.

Segundo Moraes (2007), a automação industrial traz vários benefícios para a indústria. Dentre eles, os custos de produção são reduzidos, aumenta o nível de qualidade das informações, aumenta a segurança dos operários, diminui as perdas de materiais e de energia, melhora o planejamento e controle da produção.

Em indústrias de processos contínuos como empresas de mineração, cuja produção é medida em toneladas de minério de ferro, a pesagem da quantidade de minério pode ser feita através de balanças industriais instaladas em correias transportadoras. A balança industrial mede a massa instantânea do minério sobre uma parte da correia, onde é feito um cálculo para determinar a vazão mássica de minério. Segundo Chaves (2002), todo processo de beneficiamento de um minério qualquer deve ter um controle de massa, onde cada operação unitária deve ter o seu balanço. No processo de cominuição, o alimentador de sapatas representa o equipamento que fornece a vazão mássica da primeira operação unitária.

A automação industrial proporciona processos cada vez mais automatizados e gerenciáveis em tempo real. Com o aumento da necessidade de controle, a exigência em ter instrumentos com maior precisão e acurácia nas instalações da planta nem sempre podem ser atendidas.

Moraes (2007) afirma que para estabelecer o comportamento estático e dinâmico dos sistemas físicos de forma apropriada utiliza-se sempre um esquema de realimentação ou feedback. O resultado da saída do sistema é usado como referência para eliminar as perturbações dentro de certos limites, tornando-o a mais obediente aos operadores. Diante da necessidade em ter o controle da taxa de alimentação do processo de cominuição, a medição da vazão mássica na balança da correia transportadora deve ser usada como referência do controle de velocidade do alimentador de sapatas.

No processo de cominuição, o alimentador de sapatas possui um controle de velocidade para variar a quantidade de minério que é fornecida para o processo. Esse tipo de equipamento não possui uma medição de vazão mássica. Neste caso, para obter essa informação nesse processo é necessária a instalação de uma balança na próxima correia transportadora em sequência. Isso acarreta em um atraso na informação, ou seja, de acordo com a velocidade no alimentador de sapatas, o PLC só perceberá o resultado em vazão mássica de minério após alguns instantes de operação. Esse atraso de resposta pode causar uma instabilidade na malha

de controle, extrapolar os níveis de segurança dos equipamentos e diminuir a vida útil dos mesmos.

A resposta da malha de controle da velocidade do alimentador de sapatas possui um comportamento oscilatório. Esse comportamento gera taxas altas de vazão de minério de ferro e colocando a integridade dos equipamentos em risco. De acordo com os fatos e situações observadas nesse processo, está claro que o tempo morto na resposta da malha de controle é um causador dos problemas. A elaboração de um compensador de tempo morto poderá minimizar esses problemas, desde que, o modelo desse preditor consiga representar a dinâmica do processo. O modelo matemático pode ser desenvolvido a partir dos conceitos da física ou natureza do processo. Em casos que não seja possível a modelagem pela física, o modelo matemático pode ser desenvolvido por meio de técnicas de identificação de sistemas.

1.3 Objetivos

A proposta deste trabalho é aplicar técnicas de identificação de sistemas e estimação de parâmetros no desenvolvimento de um modelo matemático. O modelo matemático irá representar a PV (Variável de processo), cujos parâmetros serão estimados aplicando técnicas de identificação de sistemas. O modelo desenvolvido será implementado como um compensador de tempo morto na malha de controle desse processo. Objetivando que a malha de controle tenha uma resposta suavizada, sem causar impactos negativos na planta que possam prejudicar a integridade dos equipamentos.

Espera-se atingir os seguintes objetivos específicos com a implantação de um preditor na malha de controle de velocidade do alimentador de sapatas:

- Suavizar a resposta do sistema.
- Eliminar *overshoot*;
- Estabilização da resposta do sistema;
- Diminuir paradas do processo por falha de corrente alta nos britadores;
- Eliminar paradas do processo por taxa alta de vazão de minério no transportador de correia;
- Diminuir paradas do alimentador de sapatas por nível baixo do silo;

- Diminuir fila de caminhões no silo do alimentador de sapatas;
- Diminuir paradas do processo por nível alto nos britadores.

Após a implementação do compensador de tempo morto na malha de controle da velocidade do alimentador de sapatas, espera-se um aumento da produtividade do processo de britagem. Com a diminuição da variabilidade da taxa da vazão de minério no transportador de correia, a vazão média de minério de ferro pode ser aumentada.

A produtividade desse processo está atrelada a disponibilidade e utilização física dos equipamentos. Ao atingir os objetivos deste trabalho, os equipamentos terão maior disponibilidade de operação. Sendo assim, como o aumento da produtividade, o aumento da disponibilidade física dos equipamentos é mais uma meta deste trabalho a ser atingida.

1.4 Estrutura do texto

Esta monografia está dividida em cinco capítulos, sendo que, o presente capítulo apresenta a estrutura organizacional deste trabalho juntamente com a justificativa e seus objetivos. O segundo capítulo tem a finalidade de apresentar e descrever o processo no qual foram realizados os trabalhos descritos nessa monografia. No terceiro capítulo, são descritos os conhecimentos adquiridos na literatura que possibilitaram o atendimento dos objetivos deste trabalho. No quarto capítulo é apresentado os resultados obtidos, após a aplicação prática das técnicas de identificação, modelagem e implantação do preditor de Smith. O último capítulo apresenta as conclusões e considerações finais adquiridas pelo estudo.

2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O processo que utiliza o alimentador de sapatas consiste em uma instalação de britagem de minério de ferro de uma empresa mineradora. O alimentador de sapatas está instalado sob um silo onde é descarregado o material transportado por caminhões fora de estrada, cujo minério é proveniente das cavas da mina. Esse material é britado e reduzido a uma granulometria capaz de ser transportado por correias até um pátio, onde é feita uma homogeneização do minério que é enviado para a usina de beneficiamento.

2.1 Visão geral da instalação de britagem

A instalação de britagem consiste num processo de cominuição. O objetivo desse tipo de instalação é reduzir a granulometria das partículas de minério para serem beneficiadas em outros processos subsequentes. Nos processos subsequentes, as operações de concentração visam separar as partículas das diferentes espécies de minerais, como explica Chaves (2002), que as operações de cominuição são basicamente os sucessivos estágios de britagem. Estágios que visam colocar as partículas minerais no tamanho adequado às diferentes operações a que devem ser submetidos, que permitem o transporte ou estocagem para homogeneização.

A Figura 1 apresenta o fluxograma do primeiro estágio do processo de cominuição. Essa mineradora possui duas plantas de britagem distintas. Este trabalho será realizado somente na Britagem Primária da área 1211AA que está em destaque na Figura 1. Por ser uma instalação mais nova, esta área foi intitulada como britagem complementar.

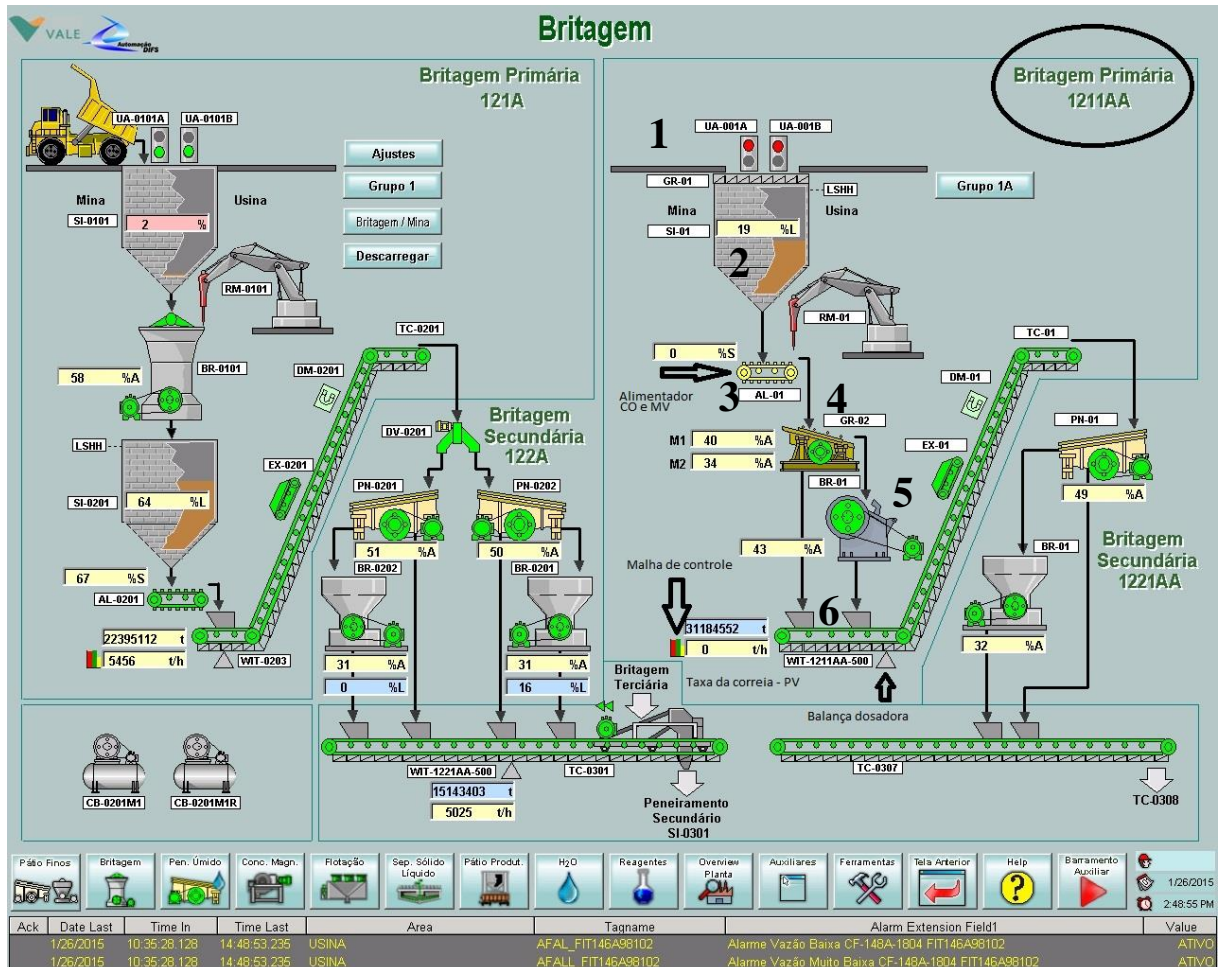


Figura 1 - Tela do supervisor com o sinóptico do setor de cominuição mostrando cada processo unitário até o ponto de medição da taxa de minério desse processo. (1) Ponto de basculamento de minério; (2) Silo de armazenamento de minério; (3) Alimentador de Sapatas; (4) Peneira Industrial; (5) Britador; (6) Correia Transportadora. Fonte: Aplicativo da empresa.

Na britagem complementar existem dois pontos de basculamento de minério no silo de entrada, lado mina e lado usina, porém, só pode ocorrer um basculamento por vez. A liberação de basculamento é feita visualmente por um semáforo em cada lado, onde a cor verde libera o basculamento e a cor vermelha bloqueia.

O processo de britagem inicia-se com a retirada do material do silo por meio de um equipamento conhecido como alimentador de sapatas. Na sequência do processo, o alimentador envia o material para uma peneira que faz uma classificação por granulometria, onde o material mais grosso é enviado para um britador que reduz o tamanho das partículas. O material mais fino que sai da peneira, juntamente com o material que passa pelo britador são enviados para uma correia transportadora. Nessa correia está instalada uma balança que mede a vazão mássica do material retirado do silo.

Para facilitar o entendimento do processo, na Figura 1, as etapas da planta de britagem foram identificadas por números. Cada etapa da planta será explicada com detalhes neste trabalho.

2.1.1 Etapa 1 – Ponto de basculamento de material

Esta etapa é o ponto de interface entre a mina e britagem. Este local é onde ocorre o abastecimento de material no processo de cominuição. O transporte de material entre a mina e a britagem é feito por caminhões intitulados como fora de estrada. Essa classificação de frota de caminhões é devido ao seu tamanho e capacidade de carga.



Figura 2 - Caminhão fora de estrada modelo 793F, utilizado no processo de transporte de carga. Fonte: WWW.CAT.COM, 2016¹

A Figura 2 representa um caminhão utilizado nessa mineradora que é o modelo 793F fabricado pela empresa Caterpillar. Esse caminhão tem a capacidade de carga útil de 226,8 toneladas.

¹ http://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/18092621.html

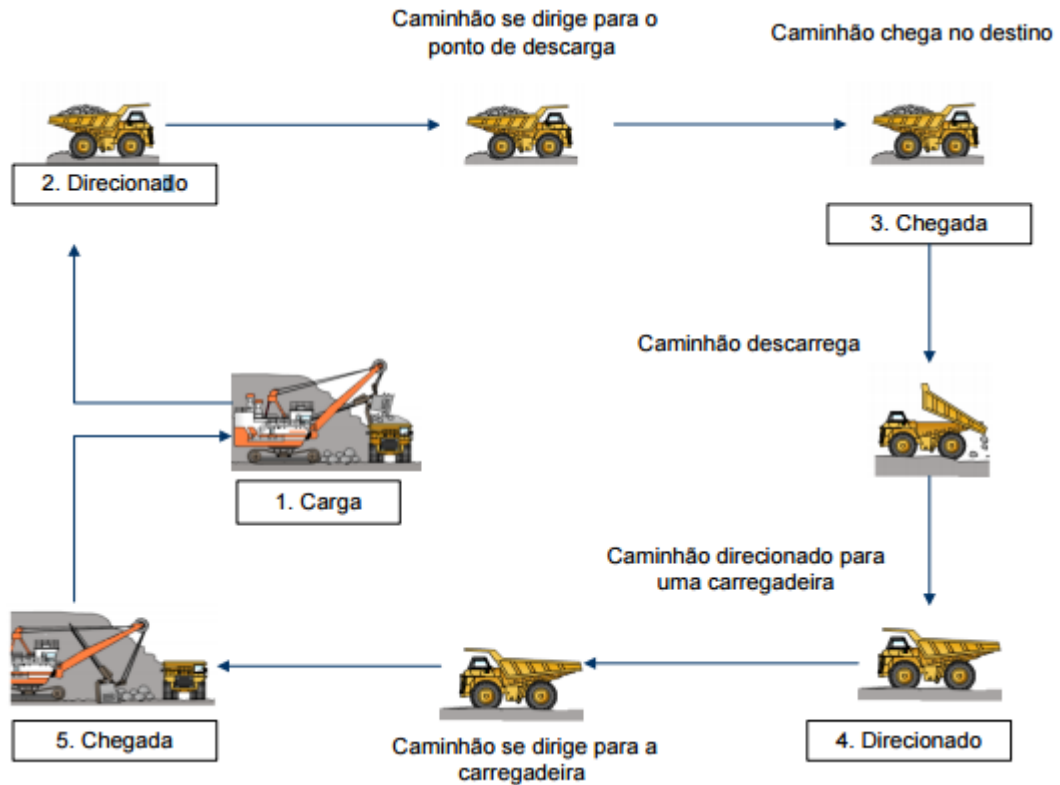


Figura 3 - Fluxograma do ciclo de carregamento e transporte de minério na mina mostrando as etapas que compõem esse processo. (1) Ponto de carregamento do caminhão; (2) Direcionamento do caminhão; (3) Ponto de chegada para basculamento do caminhão; (4) Direcionamento do caminhão; (5) Chegada do caminhão para carregamento. Fonte: Aplicativo da empresa.

A Figura 3 representa o fluxo de carregamento e transporte. Esse ciclo inicia e termina quando partem de um ponto de carga que é feita por um equipamento de carga (ponto 1) para um ponto de basculamento sem paradas intermediárias que é a chegada no silo (ponto 3). O ponto de chegada é o local que o caminhão recebe informação de um novo destino. Geralmente nesse ponto pode ocorrer fila de caminhões ou pode ficar um período maior sem ter basculamento. Isso vai depender de vários fatores implícitos na operação de mina.

2.1.2 Etapa 2 – Silo de entrada

O silo de entrada é utilizado para receber e armazenar o material que vem da mina através dos caminhões fora de estrada. O material desse silo é retirado pelo alimentador de sapatas de acordo com a demanda definida pelo operador. Esse silo possui uma medição de nível que é usada para efetuar controles discretos para liberação de basculamento do caminhão fora de estrada. O basculamento dos caminhões é controlado pela sinalização dos semáforos de

acordo com o nível do silo. O nível do silo também controla o acionamento do Alimentador de Sapatas, liberando o funcionamento do Alimentador numa faixa de nível operacional.

A Tabela 1 descreve o funcionamento lógico do Alimentador de Sapatas e do acionamento do semáforo que controla o basculamento dos caminhões fora de estrada.

Tabela 1 – Controle pelo nível do silo

Equipamento	Lógica do funcionamento
Semáforo verde UA001A - lado mina	((Nível silo < 70% e Alimentador funcionando) ou (Nível silo < 60 %)) e (sem presença caminhão lado usina)
Semáforo verde UA001B - lado usina	((Nível silo < 70% e Alimentador funcionando) ou (Nível silo < 60 %)) e (sem presença caminhão lado mina)
Semáforo vermelho UA001A - lado Mina	NOT (((Nível silo < 70% e Alimentador funcionando) ou (Nível silo < 60 %)) e (sem presença caminhão lado usina))
Semáforo vermelho UA001B - lado Usina	NOT (((Nível silo < 70% e Alimentador funcionando) ou (Nível silo < 60 %)) e (sem presença caminhão lado usina))
Liga Alimentador de Sapatas	Nível >= 40%
Desliga Alimentador de Sapatas	Nível <= 25%

2.1.3 Etapa 3 – Alimentador de Sapatas

O alimentador de sapatas está montado sob o silo de entrada, sendo o equipamento responsável por inserir o material no processo de britagem. Consiste basicamente de duas correntes sem fim com sapatas de manganês fundido ou de chapa soldada e parafusada em um elo de cada corrente. As correntes são acionadas por rodas dentadas montadas no eixo motriz. As sapatas se movem com as correntes e se articulam sobre as rodas dentadas do acionamento para descarregar o material.



Figura 4 - Exemplo de Alimentador de Sapatas com as mesmas características do equipamento sob estudo nesse trabalho. Fonte: WWW.METSO.COM.BR, 2016²

A Figura 4 é um exemplo de alimentador de sapatas que tem como objetivo extrair ROM (*Run Of Mine Ore*), que é o minério bruto na sua forma natural em grandes tamanhos. Ela Movimenta materiais de difícil manuseio, abrasivos e pesados sob condições de impacto severo.

2.1.4 Etapa 4 – Peneira Vibratória

Este equipamento está compreendido entre os sucessivos estágios de britagem. Seu objetivo é a separação de tamanhos, com o auxílio de motores que fazem a vibração de todo o equipamento. O material mais fino passa pelos furos da tela da peneira, enquanto que o material com maior granulometria transborda caindo diretamente na câmara do britador.

² <http://www.metso.com.br/produtos/alimentadores/alimentador-de-sapatas/>

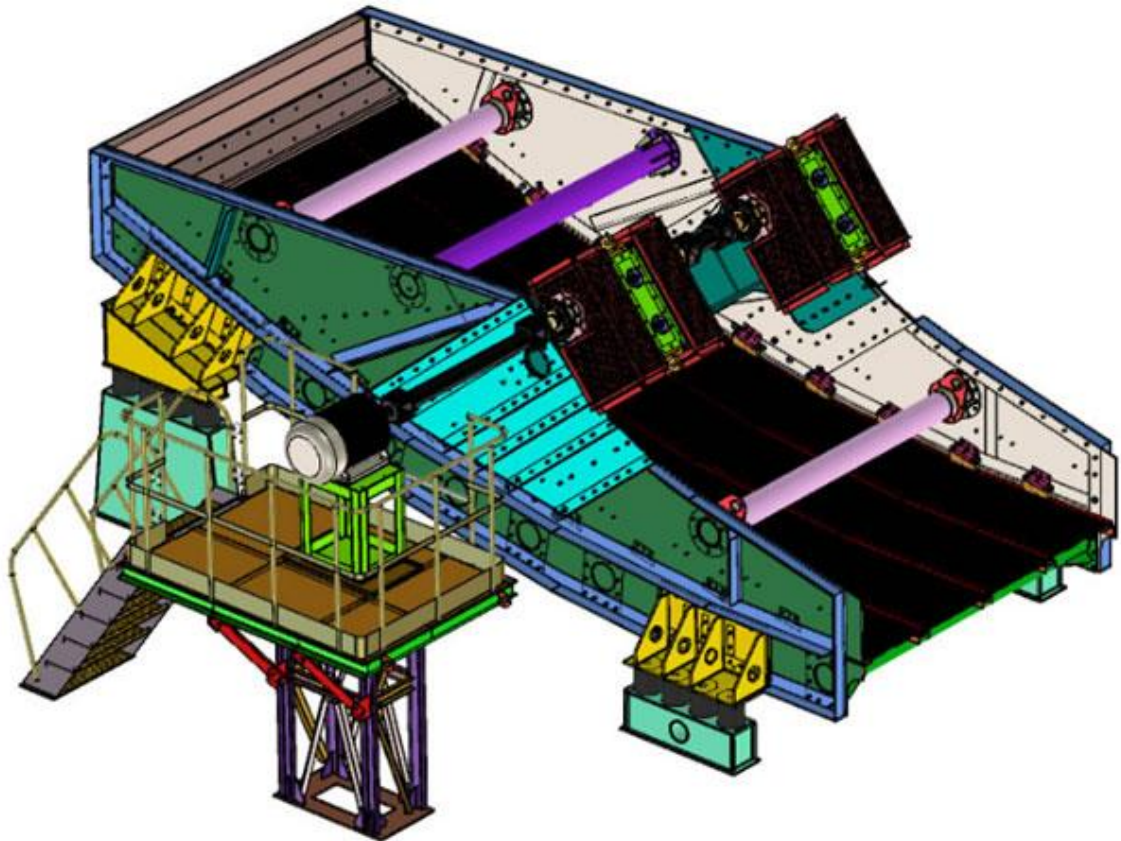


Figura 5 - Exemplo de Peneira Vibratória similar ao equipamento utilizado no processo de cominuição. Fonte: WWW.VIBRATESCREEN.COM.BR, 2016³

A Figura 5 representa uma peneira vibratória, que é análogo ao processo estudado. No processo, o objetivo é evitar que as partículas finas de minério sejam enviadas para o britador.

2.1.5 Etapa 5 – Britador

Esta etapa é o primeiro estágio de britagem, onde está instalado um britador giratório. O objetivo é reduzir a granulometria do material basculado no silo de entrada. Seu funcionamento consiste no movimento de aproximação e distanciamento do cone central em relação à carcaça invertida.

³ <http://www.vibratescreen.com.br/1-12-equal-thickness-screen.html>

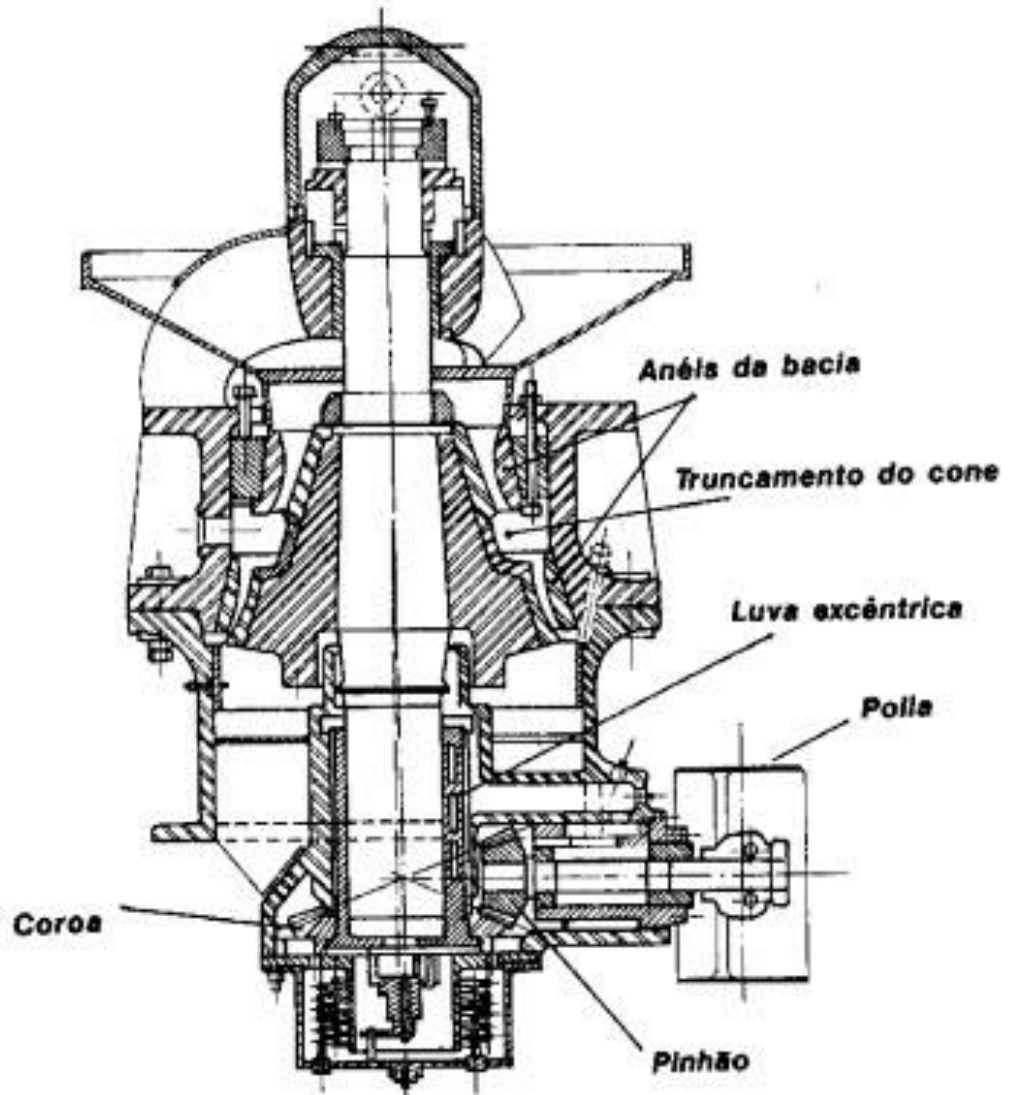


Figura 6 - Exemplo de Britador Giratório utilizado no tipo de processo de cominuição em estudo. Fonte: WWW.METALICA.COM.BR, 20164

A Figura 6 representa um equipamento de britagem primária. Conforme o processo de estudo dessa monografia é utilizado quando existe uma grande quantidade de material a ser fragmentado.

2.1.6 Etapa 6 – Correia Transportadora

⁴ <http://wwwo.metalica.com.br/artigos-tecnicos/britadores-e-moinhos>

A correia transportadora é o equipamento responsável pelo transporte de material com fluxo contínuo, podendo ser utilizado para longas distâncias. Sua construção consiste basicamente de polias impulsionadas por um motor elétrico que movimenta uma correia sobre rolos.



Figura 7 - Exemplo de Correia Transportadora com as mesmas características de transporte de minério correspondente ao processo em análise. Fonte: <http://ore-beneficiation.com.br/>, 20165

No processo em estudo deste trabalho, a correia transportadora recebe o material enviado pelo alimentador de sapatas após ser peneirado e reduzida a sua granulometria a um tamanho ideal para transporte. Nesse ponto é importante conhecer e monitorar a quantidade de material que está sendo transportada, pois representa todo o material que está sendo fornecido à planta de cominuição.

Não existe uma tecnologia que possa medir a vazão de minério nos equipamentos que antecedem a correia transportadora. Por isso, nesse ponto está instalada uma balança, que informa o valor de vazão mássica de minério de ferro fornecido pela primeira etapa do processo de cominuição. A informação de vazão é calculada na balança através de medição de peso instantâneo e velocidade da correia.

⁵ <http://ore-beneficiation.com.br/1-10-belt-conveyor.html>

2.1.7 Informações adicionais

É importante conhecer nesse processo em estudo, o tipo de material que é tratado, pois o mesmo é que define as instalações de tratamento. O processo inicia com a extração de minério, cuja composição das rochas extraídas possui maior concentração de minerais úteis. De acordo com essa variação de compostos, no início do processo de beneficiamento, o material não é homogêneo. Nesse ponto do processo, a densidade numa mesma quantidade de material é variável.

Segundo Chaves (2002), raramente as espécies minerais se encontram puras na natureza. No processo de tratamento, sempre partimos de uma concentração menor do elemento. Cada operação unitária tira partido das diferenças entre propriedades físicas características e individualizadas para obter uma concentração máxima possível.

No processo de britagem, cada equipamento possui uma identificação chamado de TAG, sendo representativo para cada tipo de equipamento e qual a sua área de funcionamento. Diante disso, os equipamentos serão referenciados nesta monografia conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Lista de identificação dos equipamentos por TAG

Equipamento	TAG
Silo de entrada	SI1211AA01
Alimentador de Sapatas	AL1211AA01
Peneira	PE1211AA01
Britador	BR1211AA01
Correia Transportadora	TC1211AA01
Vazão mássica na TC1211AA01 (Balança)	WIT_TC1211AA01

2.2 Controle da taxa de alimentação da britagem complementar

O controle da taxa de alimentação nesse processo é feito por um controlador PI programado em um CLP. O Set-point é definido pelo técnico de uma sala de controle e a variável

manipulada é a velocidade do motor do alimentador de sapatas. A variável de processo é a taxa de uma balança na unidade de engenharia em t/h de minério de ferro.

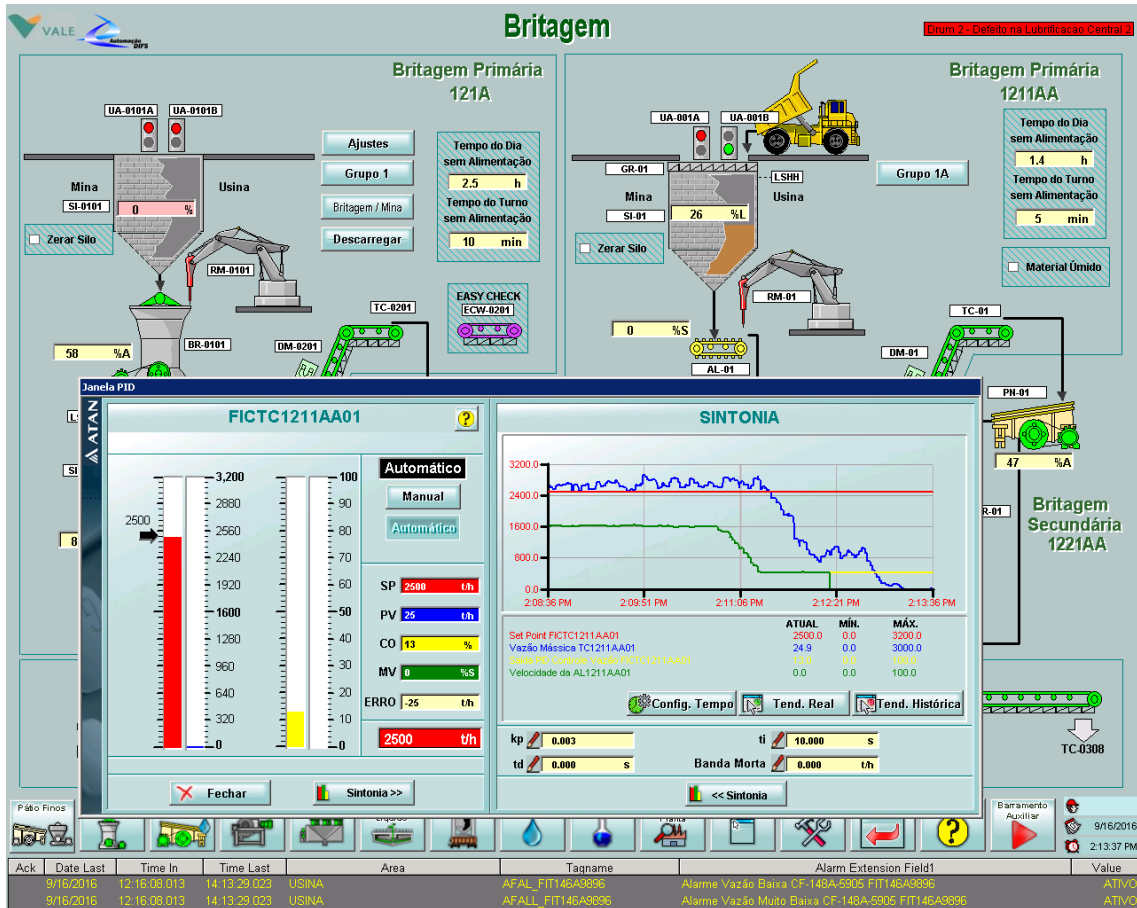


Figura 8 - Tela do supervisor e da malha de controle que é utilizada para efetuar comandos e acompanhar o desempenho da malha. Fonte: Aplicativo da empresa.

A Figura 8 mostra um sinóptico, que o técnico de sala de controle utiliza para operar a planta. É um sistema supervisor que faz a interface entre o operador e os equipamentos do processo. Por meio dessa interface, além da operação remota, o técnico de sala pode acompanhar o funcionamento dos equipamentos e monitorar as variáveis do processo.

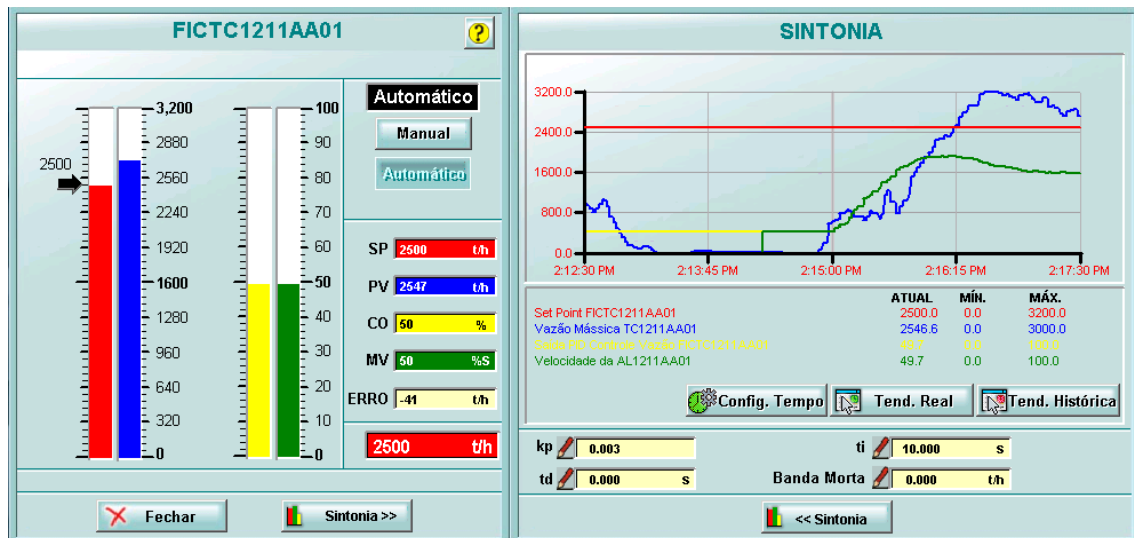


Figura 9 - Tela do supervisor com a malha de controle FICTC1211AA01 usada como interface para acompanhamento e comandos do técnico de sala de controle. Fonte: Aplicativo da empresa.

De acordo com a Figura 9 percebe-se que a malha de controle FICTC1211AA01 utiliza um controlador PI, cuja sintonia de ganho é 0,003 no k_p e tempo integral de 10s no t_i . O valor do Set Point é definido pelo técnico da sala de controle e a variável de processo é a medição de vazão mássica de minério de ferro na TC1211AA01. De acordo com o gráfico de tendência, o comportamento da variável manipulada só tem uma resposta após um tempo morto. Esse tempo morto na resposta do sistema ocorre devido à distância física entre o gerador do evento no AL1211AA01 com o ponto de medição que é a balança WIT_TC1211AA01.

Para facilitar a identificação das variáveis da malha de controle FICTC1211AA01, essas informações estão contidas na Tabela 3.

Tabela 3 - Identificação das variáveis da malha de controle FICTC1211AA01

Equipamento	TAG
Set Point (SP)	Entrada manual do valor pelo supervisor
Variável do Processo (PV)	WIT_TC1211AA01
Saída do Controlador (CO)	Saída malha de controle FICTC1211AA01
Variável manipulada (MV)	Retorno de velocidade do AL1211AA01
Ganho proporcional (K_p)	0,003
Tempo integral (T_i)	10s

O controlador PI da malha FIC121AA01 foi desenvolvido e está operante no PLC da Siemens, modelo S7- 400, com ação direta. O valor do erro e da PV são normalizados antes de serem calculados na fórmula paralela, onde as ações proporcional, integral e derivativo são ativados individualmente.

O PLC Siemens S7 – 400 utiliza a seguinte fórmula no controlador PI, cuja ação derivativa é desabilitada.

$$PID_{OUT} = GAIN * ER_{normalized} * \left(1 + \frac{1}{tis}\right).$$

O controle de taxa nessa etapa de cominuição é necessário devido às limitações dos equipamentos e do processo. A estabilidade dessa taxa impacta diretamente no desempenho da planta. Um dos agravantes deste controle é o tempo de resposta do sistema, que dificulta a sintonia da malha de controle. A balança que mede a variável de processo só pôde ser instalada em um transportador de correia, cuja distância do gerador do evento é o causador do atraso puro de tempo na resposta do processo.

A cada partida do alimentador de sapatas, o controlador demora estabilizar o processo. Como existem proteções por taxa alta, nível alto, corrente alta e quaisquer intertravamentos referentes ao volume de minério no processo, a planta é paralisada. O retorno ao funcionamento da planta só ocorre após as variáveis do processo atingirem os valores de segurança. Uma possível causa é o atraso puro de tempo do sistema, onde a estabilização depende do tempo em funcionamento do alimentador. Um compensador de tempo morto pode suavizar a resposta do sistema evitando paradas desnecessárias no processo.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo informar sobre o método e etapas utilizadas para conduzir a pesquisa e desenvolvimento deste trabalho. Essa informação é indispensável para obter o melhor desempenho na sua realização. De acordo com Tozoni-Reis (2009), a metodologia científica quando utilizada como um caminho para a análise de um processo passa a ser um instrumento que possibilita analisar criticamente todo o desenvolvimento do trabalho.

Segundo Marconi e Lakatos (1991), para alcançar o objetivo com maior segurança e economia é necessária a utilização de um método. Método é um conjunto de atividades sistemáticas e racionais com conhecimentos válidos e verdadeiros, traçando o caminho a ser seguido, detectando erros e auxiliando as decisões dos cientistas.

Com o intuito de obter os melhores resultados neste trabalho, esse capítulo foi dividido em três partes. O capítulo inicia com técnicas de identificação de sistemas com tempo morto, sendo utilizado o método de mínimos quadrados. Na última seção são apresentados os métodos de controle com compensador de tempo morto.

3.1 Técnicas de identificação de sistemas com tempo morto

A partir de análises do comportamento de um processo é possível construir matematicamente modelos que representem a dinâmica desse sistema. A aplicação de técnicas de identificação de sistemas utiliza os dados coletados para representar o sistema físico. Aguirre (2015) afirma que identificação de sistemas é um processo alternativo para situações em que seja inviável desenvolver um modelo a partir de equações que regem a física do processo.

De acordo com Landau e Zito (2002), existem dois tipos de modelos dinâmicos utilizados na aplicação das técnicas de identificação de sistemas. Modelos não paramétricos que utilizam, por exemplo, a análise gráfica de uma resposta em frequência, ou uma resposta ao degrau. Modelos paramétricos, que podem utilizar funções de transferência, equações diferenciais e equações a diferenças.

Landau e Zito (2002) concordam com Aguirre (2015) que se devem considerar algumas etapas para determinar o modelo dinâmico de um sistema. Entretanto, Landau e Zito (2002)

propõem quatro etapas e Aguirre (2015) propõe cinco etapas, sendo considerada, após a coleta de dados por testes dinâmicos, a escolha da representação matemática a ser usada.

No desenvolvimento deste trabalho, as cinco etapas propostas por Aguirre (2015) foram estudadas e empregadas.

3.1.1 Etapas para identificação e modelagem de sistemas

Inicialmente na aplicação das técnicas de identificação de sistemas é necessário coletar dados do processo através de testes dinâmicos. Esses dados devem ser gerados de forma a possibilitar o entendimento do processo, cuja excitação da planta deve ser suficiente para extrair informações da dinâmica do sistema. Essa etapa consiste em efetuar testes com a malha aberta excitando a entrada do processo, cujos dados resultantes do processo e os dados de excitação são utilizados para definir o melhor modelo matemático para representar a dinâmica do sistema.

A próxima etapa consiste na escolha da representação matemática a ser usada. Dois tipos de abordagem podem ser utilizados para obter o melhor modelo que represente a dinâmica do sistema. Abordagem de caixa cinza, onde a estrutura do modelo já é conhecida e abordagem caixa preta, onde não existe nenhum conhecimento do sistema.

Após a definição do modelo matemático, a próxima etapa é a determinação da estrutura do modelo. Basicamente, essa etapa procura obter a ordem do sistema, cujo valor será utilizado no modelo matemático encontrado. A ordem do modelo deve ser suficiente para descrever a dinâmica dominante do sistema, podendo não ser uma ordem tão grande, cujas diferenças entre os modelos com ordens diferentes podem ser comparadas.

Depois de obter a representação matemática e a estrutura do modelo, o próximo passo é estimar os parâmetros. Existem vários algoritmos que podem ser utilizados para estimação dos parâmetros, dos quais, vários são variantes do método de mínimos quadrados. Este método é limitado para estimar parâmetros de modelos lineares nos parâmetros, cuja dinâmica do sistema não é variada com o tempo e as variáveis do sistema satisfazem o princípio da superposição.

O último passo na identificação do sistema é a validação do modelo. Essa validação consiste em comparar as melhores opções encontradas, verificando se os modelos atendem as características de interesse do sistema. A escolha do modelo é muito subjetiva, pois os resultados esperados dependem da aplicação pretendida do modelo. Quanto maior for a representatividade dos dados coletados na primeira etapa, melhor será a aproximação matemática do modelo escolhido.

3.1.2 Estimador de mínimos quadrados

O método de mínimos quadrados (MQ) é um método paramétrico utilizado para estimar parâmetros de modelos discretos. De acordo com Aguirre (2015), a finalidade desse método é minimizar a soma dos quadrados dos resíduos de um modelo dinâmico, cujos parâmetros foram estimados por este método.

Após a escolha do modelo matemático do sistema, a estimação dos parâmetros pelo MQ é feita a partir dos dados coletados do sistema. Os dados escolhidos devem ser capazes de explicar a dinâmica do sistema, dessa forma, o MQ estima os parâmetros de uma única função capaz de representar o sistema em análise. A equação é composta por um vetor de variáveis dependentes (y), dados de estimação (x) e os parâmetros estimados (Θ), tendo como objetivo encontrar uma solução que tenha algum significado.

Considerando um conjunto de equações com o número de restrições maior do que o número de incógnitas, a matriz de regressores não é quadrada, cuja equação normal pode ser encontrada multiplicando a matriz por sua transposta. No caso da não singularidade desse produto, o resultado será uma matriz pseudoinversa.

$$\Theta = [X^{-T}X]^{-1}X^{-T}Y \quad (3.3)$$

Na Eq. 3.3, Y representa o vetor de variáveis dependentes, X representa os dados de estimação (matriz de regressores) e Θ é o vetor de parâmetros a ser estimado. Essa é a única função que satisfaz simultaneamente as n restrições do sistema de equação.

A Eq. 3.3 é uma das soluções que podem ser usadas para um sistema sobredeterminado. Para estimação de parâmetros de um modelo ARX, o resultado é obtido usando manipulações

algébricas aplicadas a matrizes, onde basicamente são utilizadas funções de auto correlação e correlação cruzada entre os dados de entrada e de saída do sistema.

$$\begin{bmatrix} \psi 1 \\ \psi 2 \\ \vdots \\ \psi m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(k-1) & \dots & y_1(k-n) & x_1(k-d-1) & \dots & x_1(k-d-n) \\ y_2(k-1) & \dots & y_2(k-n) & x_2(k-d-1) & \dots & x_2(k-d-n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_m(k-1) & \dots & y_m(k-n) & x_m(k-d-1) & \dots & x_m(k-d-n) \end{bmatrix},$$

dessa forma, a Eq. 3.3 pode ser montada para um sistema sobredeterminado tomando restrições da equação de *Wiener-Hopf*. Utilizando a técnica de mínimos quadrados com a matriz de regressores ψ adquirimos o benefício da redução do efeito do ruído implicitamente adquirida pelo uso das funções de auto correlação $r_x(k)$ e correlação cruzada $r_{xy}(k)$ juntamente com outra matriz deve ser formada somente com os dados de saída do sistema

$$Y = \begin{bmatrix} y_1(k-1) & \dots & y_1(k-n) \\ y_2(k-1) & \dots & y_2(k-n) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_m(k-1) & \dots & y_m(k-n) \end{bmatrix}.$$

Considerando métodos de predição de erro, o vetor de regressores $\psi = [X^{-T}X]^{-1}X^{-T}$ para estimação de modelos lineares nos parâmetros de um modelo dinâmico ARX é representado da seguinte forma:

$$\psi_{yu}(k-1) = [y(k-1) \dots y(k-ny) u(k-d-1) \dots u(k-d-nu-1)]^T \quad (3.4)$$

Sendo utilizado um preditor de um passo à frente, onde d representa o atraso puro de tempo do sistema, $u(k)$ são as amostragens do sinal de entrada, $y(k)$ do sinal de saída e k indica o instante da observação. Após a estimação dos parâmetros, o valor estimado da resposta do sistema pode ser obtido da seguinte forma:

$$\hat{y}(t) = \psi_{yu}^T(k-1)\hat{\theta}_{MQ} + \xi(k) \quad (3.7)$$

Onde os parâmetros $\hat{\theta}_{MQ} = [\psi^T\psi]^{-1}\psi^TY$ foram estimados a partir da matriz de regressores ψ e Y contendo os dados de entrada e saída do sistema.

A definição do tempo morto pode ser feita por observação de uma resposta ao degrau do sistema. Nesse método, pressupõe que o ruído do sistema é suficientemente baixo, porém, em sistemas que o tempo morto não é detectado com precisão, Aguirre (2015) sugere a utilização de uma função de correlação cruzada. Essa função consiste num método não paramétrico, capaz de revelar o atraso puro de tempo através da correlação existente entre os sinais de entrada e de saída do sistema.

O objetivo do MQ em um modelo ARX é estimar os parâmetros $\Theta_{MQ} = (\psi^T \psi)^{-1} \psi^T Y$ utilizando os dados de $y(t)$ e do vetor ψ^T de regressores para que uma única equação possa representar a dinâmica do sistema. A diferença entre o valor real e o valor da resposta do modelo deve ser o mínimo possível. O vetor de resíduos pode ser escrito da seguinte forma:

$$\epsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (3.6)$$

Considerando que a estimação de parâmetros minimiza a soma do quadrado dos resíduos, os erros de predição um passo à frente serão sempre os menores possíveis. Após a estimação dos parâmetros pode ser feita uma simulação, dessa forma, a verificação da resposta simulada com a resposta do sistema pode ser avaliada. Para simulação de um modelo ARX de primeira ordem com atraso puro de tempo, a equação pode ser definida como:

$$y(k) = \hat{\theta}_1 y(k-1) + \hat{\theta}_2 u(k-d-1), \quad (3.7)$$

onde k representa o instante observado, θ é o parâmetro estimado, sendo que, $y(k-1)$ deve ter uma inicialização representativa do processo. Os valores de $u(k-d-1)$ devem ser obtidos por um *buffer* circular que contenha os valores armazenados pelos dados de entrada do sistema considerando o atraso puro de tempo (d).

De acordo com Aguirre (2015), a função de transferência é uma das representações mais importantes de sistemas dinâmicos lineares. Dorf e Bishop (2001) afirma que funções de transferência só podem ser definidas para sistemas lineares e estacionários, onde representa a relação que descreve a dinâmica do sistema observado.

Uma resposta temporal similar à obtida na Eq. 3.7 pode ser observada e analisada na modelagem de uma função de transferência equivalente.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\tau ds}.$$

Os valores de K e τ podem ser obtidos conforme relação com os parâmetros estimados no modelo discreto ARX. Aplicando a transformada inversa de Laplace no modelo da função de transferência de primeira ordem com atraso puro de tempo podemos perceber a similaridade dos modelos:

$$\mathcal{L}^{-1}[(\tau s + 1)Y(s) = K e^{-\tau ds} R(s)] = \{y(t) = -\tau \dot{y}(t) + kx(t - \tau d)\},$$

discretizando e obtendo a equação a diferenças:

$$y(k) = \left(1 - \frac{T}{\tau}\right) y(k - 1) + \left(\frac{KT}{\tau}\right) x(k - 1 - \tau d),$$

onde τd é o atraso puro de tempo. Comparando com o modelo ARX de primeira ordem:

$$y(k) = \theta_1 y(k - 1) + \theta_2 u(k - d - 1),$$

cujos valores de K e τ podem ser obtidos da seguinte forma:

$$\tau = \frac{T}{1 - \theta_1}.$$

$$K = \frac{\theta_2 \tau}{T}.$$

Em que T representa o intervalo de amostragem do sistema e θ representa o vetor de parâmetros estimados pelo método de mínimos quadrados. Lembrando que a quantidade de parâmetros θ depende da ordem do sistema estimado.

3.2 Método de compensação de tempo morto em sistemas de controle

Considerando que muitos sistemas dinâmicos reais possuem um atraso puro de tempo, Aguirre (2015) afirma que atrasos de tempo têm um efeito desestabilizador na malha de controle. Dessa forma, um modelo de função de transferência obtido no projeto, considerando o atraso puro de tempo do sistema, pode produzir oscilações mesmo com controladores puramente proporcional.

Segundo Hagglund (1996), o controle derivativo do controlador PID, em muitos casos que existem tempo morto no sistema tem um bom desempenho, podendo ser combinado com um filtro passa baixa. Porém, quando o processo possui um tempo de resposta muito alto, a variável de realimentação não possui informações suficientes sobre as variações futuras. Nessas situações é recomendado o uso de um preditor juntamente com o modelo do processo.

3.2.1 Preditor de Smith

O compensador de tempo morto mais comum é o preditor de Smith. Na literatura a estrutura de predição mais usual consiste em um sistema de malha fechada com realimentação compensada. Nessa estrutura é feito um cálculo da diferença da resposta do processo, do modelo com o tempo morto e da resposta do modelo sem o tempo morto. Dessa forma, o compensador reduz o efeito do atraso puro de tempo na malha de controle.

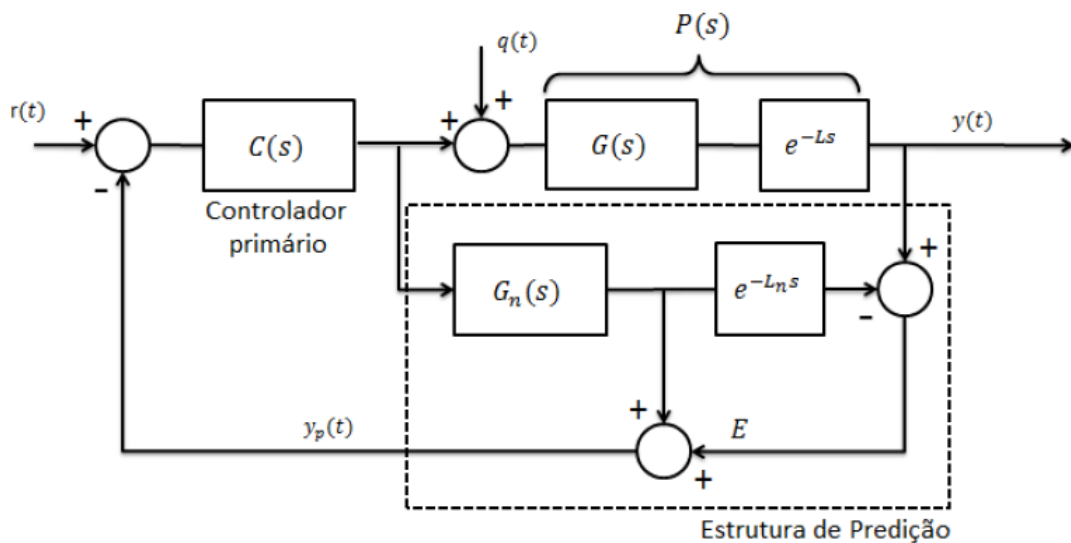


Figura 10 - Estrutura do preditor de Smith para compensação de tempo morto na resposta do sistema.

Hugglund (1996) considera que o preditor de Smith precisa ter um modelo referente ao processo, sendo que normalmente é usado um modelo de primeira ordem. Campomar, Capucchio e Lucchesi (2015) afirmam que nesses casos, para o controle de um sistema de primeira ordem, um controlador PI é suficiente.

Considerando um controlador PI e um processo com o comportamento de um sistema de primeira ordem, com uma entrada de perturbação nula $q(t)=0$, as funções de transferência do controlador, do modelo do preditor e da malha fechada são apresentadas abaixo, respectivamente:

$$C(s) = K \left(1 + \frac{1}{Ti s} \right),$$

sendo que, K é o ganho do controlador e Ti é o tempo integral.

$$Gn(s) = \frac{Kn}{1 + \tau n s} e^{-Lns},$$

em que Kn é o ganho estimado para o modelo, τn é a constante de tempo estimado para o modelo e Ln é o atraso puro de tempo do processo considerado no modelo. Portanto a função de transferência em malha fechada é:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)[P(s) + Gn(s) - Gn(s)e^{-Lns}]}$$

onde $P(s)$ representa a função de transferência do processo.

Na proposta do preditor de Smith, combinando a modelagem do processo com um controlador PI, a sua implementação dependerá apenas de cinco parâmetros. São dois parâmetros para o controlador, sendo o ganho proporcional (Kp) e o tempo integral (Ti). O modelo do preditor precisa de três parâmetros, considerando que o modelo é idêntico ao processo, os valores de Kn , τs e Ln serão definidos a partir de técnicas de identificação de sistemas.

Abe e Yamanaka (2003) fizeram um estudo comparando a solução do preditor de Smith com o *Internal Model Control* (IMC), cujo objetivo também é remover o efeito do atraso puro de

tempo na resposta da malha de controle. O desempenho de ambos os esquemas de controle depende do modelo da planta. Dessa forma, a identificação do modelo tem uma importância especial no procedimento de síntese em malha fechada.

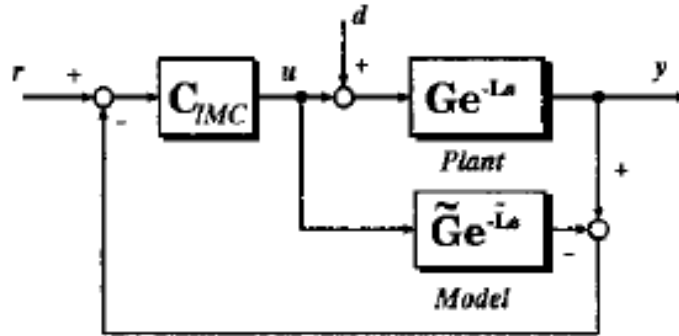


Figura 11 – Estrutura IMC com modelo da planta incorporado ao esquema do controlador.

Na estrutura IMC da Figura 11, o modelo matemático representativo da planta está incorporado no controlador. Dessa forma, $C_{IMC} = \frac{C(s)}{1+C(s)\tilde{G}}$, onde a dinâmica da planta é cancelada.

Na Figura 10, considerando que não existem erros de modelagem, de acordo com a proposta do preditor de Smith, a função de transferência em malha fechada seria expressa por:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)Gn(s)}$$

Nessa estrutura, a dinâmica da planta também é cancelada, onde o atraso puro de tempo não tem o efeito desestabilizador na resposta do sistema. A equação característica da malha não é interferida pelo atraso, como também a margem de fase, sendo mantida a condição de estabilidade do sistema.

É importante observar que na proposta do preditor de Smith, o sinal de realimentação $y_p(t)$ equivale as diferenças da PV com os resultados do modelo. O fator de correção E será nulo considerando que não existem erros de modelagem. A aplicação do preditor de Smith pode ser acompanhada de uma nova sintonia da malha de controle, cujos parâmetros foram definidos

de forma conservadora para garantir a estabilidade do sistema devido ao atraso puro de tempo do sistema.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados das aplicações das técnicas de identificação de sistemas que representa a dinâmica do processo de cominuição num ponto de operação específico. O modelo matemático será utilizado como recurso em uma malha de controle de velocidade no Alimentador de Sapatas, o qual servirá como um compensador de tempo morto.

Para as soluções apresentadas na compensação do tempo de resposta do sistema, a análise dessas soluções é pertinente, considerando a estabilidade da malha. Vários testes foram realizados considerando um aumento do tempo de resposta e o impacto das alterações nas raízes da função de transferência.

4.1 Modelagem do sistema da variação de taxa de minério de ferro no processo de cominuição

Seguindo as orientações da literatura, o primeiro passo na identificação de sistemas é a coleta dos dados. Para este trabalho, o controle da velocidade do Alimentador de sapatas foi colocado em modo manual. Nesse modo de operação, os valores de entrada do processo (MV da malha de controle) foram excitados variando o sinal em aproximadamente 10% do valor máximo. O intervalo entre as variações foi suficiente para perceber a dinâmica dominante do processo por meio das variações na PV. Dessa forma, os dados coletados como entrada e saída para elaboração do modelo são respectivamente a MV e a PV da malha de controle FICTC1211AA01.

A coleta dos dados foi realizada através de um sistema de gestão e sintonia de malhas de controle, conhecido como *PlantTriage*. Com esse sistema é possível avaliar o desempenho das malhas de controle a partir dos cadastros das variáveis que influenciam no processo, onde é possível avaliar as tendências e as correlações entre as variáveis. Foi definido um tempo de amostragem na coleta desses dados a cada 1 segundo, sendo coletados 2700 pontos.

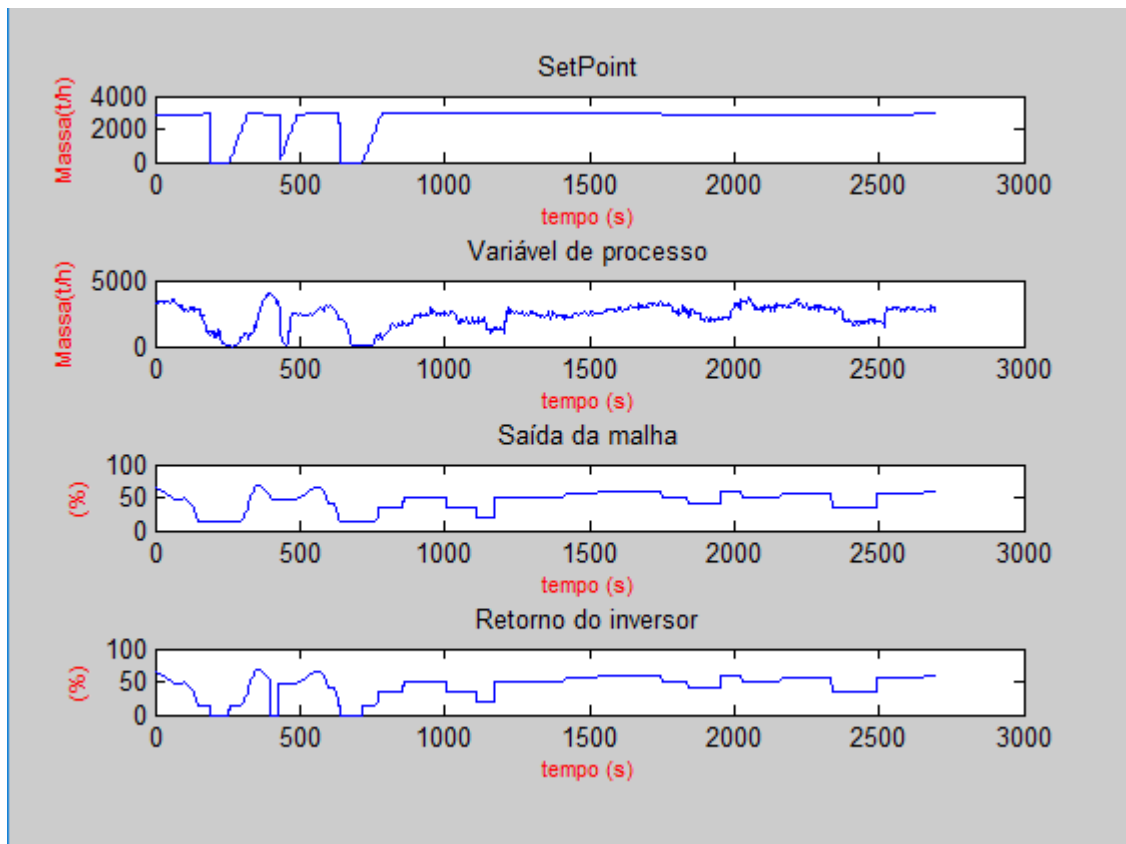


Figura 12 - Representação dos dados da malha de controle FICTC1211AA01 amostrados para análise dos resultados.

A Figura 12 representa os dados coletados referentes a malha de controle FICTC1211AA01. Em um determinado momento, durante a operação normal da malha em automático, o modo de operação foi passado para manual e iniciou-se a excitação do sistema com entrada ao degrau aproximadamente 10% do valor máximo da MV. A saída da malha e o retorno do inversor representam o valor induzido no processo. A PV, que consiste na vazão mássica na TC1211AA01, representa a resposta do sistema. Os 2700 pontos registram 16 variações de excitação no processo, a partir desses valores, o sistema pode ser identificado, tendo uma parte dos dados separados para validação do modelo.

Na sequência dos passos da identificação de sistemas, a função de transferência será utilizada para representar matematicamente a dinâmica desse sistema. A definição da ordem do sistema pode ser obtida por meio de observações da resposta do sistema.

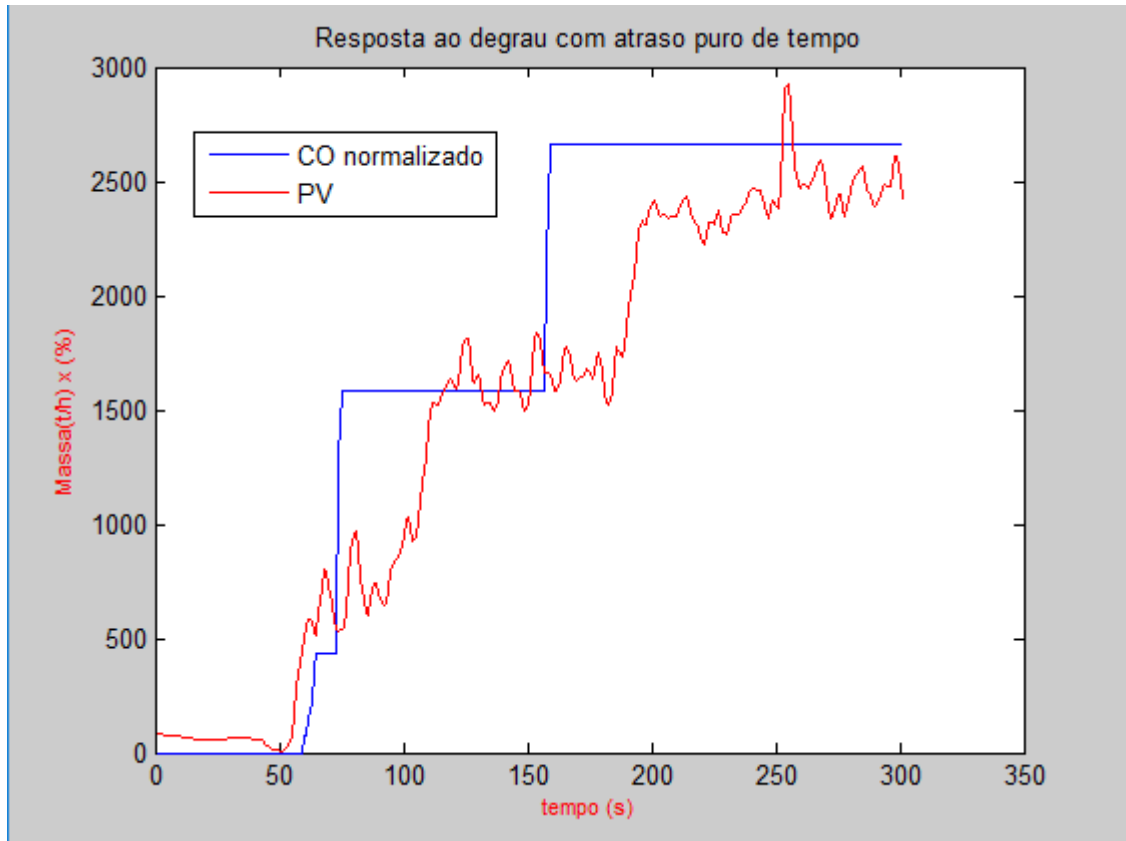


Figura 13 - Resposta da entrada ao degrau na malha de controle FICTC1211AA01 com os dados normalizados para avaliar a estrutura do modelo matemático.

Na figura 13, os dados da CO foram normalizados com a PV para facilitar na observação da resposta ao degrau. Diante da resposta, o modelo matemático no formato de função de transferência será definido como de primeira ordem. O próximo passo é definir os parâmetros para esse modelo, como também o atraso puro de tempo.

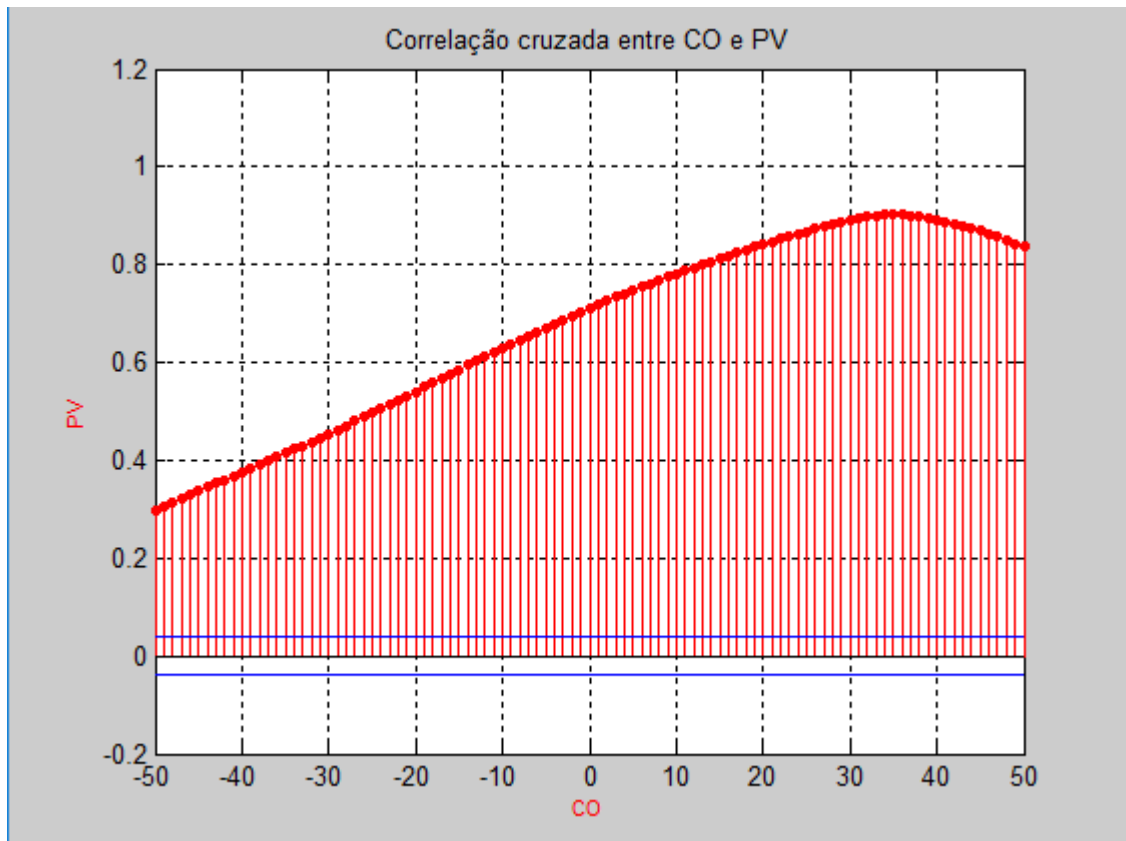


Figura 14 - Correlação entre o CO e PV da malha de controle FICTC1211AA01 usado para avaliar o atraso puro de tempo do sistema.

A função de correlação cruzada tem como objetivo quantificar o grau de semelhança entre os sinais. Dessa forma é possível identificar o momento em que essas variáveis possuem maior correlação. De acordo com a Figura 14, o atraso puro de tempo desse sistema é aproximadamente 35 segundos. Outra forma de avaliar o atraso puro de tempo é verificar a diferença entre o momento inicial da variação da MV com a variação correspondente na PV, porém, existe uma perturbação na PV que pode causar um erro na definição do atraso puro de tempo do sistema.

O estimador de parâmetros escolhido foi os mínimos quadrados, que de acordo com a literatura é ideal para identificação de sistemas com ruído nos sinais. Nesse caso, considera-se que o sinal observado tenha um ruído que impossibilite a identificação por métodos determinísticos. Devido a sua robustez ao ruído, o método de mínimos quadrados é ideal para estimar os parâmetros de uma única função com atraso puro de tempo.

Conforme descrito na seção 3, a similaridade entre o modelo ARX e um modelo de primeira ordem na forma de função de transferência pode ser explicada por meio de equações diferenciais e transformada de Laplace. Os parâmetros do modelo ARX foram adquiridos aplicando a técnica de mínimos quadrados, cuja equação a diferenças foi definida da seguinte forma:

$$y(k) = 0.9461y(k - 1) + 2.7602u(k - 35 - 1).$$

Aplicando os valores dos parâmetros $\theta_1=0.9461$ e $\theta_2 = 2.7602$ nas fórmulas $\tau = \frac{T}{1-\theta_1}$ e $K = \frac{\theta_2 \tau}{T}$, com o tempo morto $\tau d = 35$ a função de transferência que representa o sistema foi definida da seguinte forma:

$$G(s) = \frac{51.1872}{1 + 18.5445s} e^{-35s}.$$

Sendo que, para testes foi realizada uma simulação um passo à frente e para validação do modelo foram realizados testes de simulação livre utilizando a função de transferência e o modelo ARX.

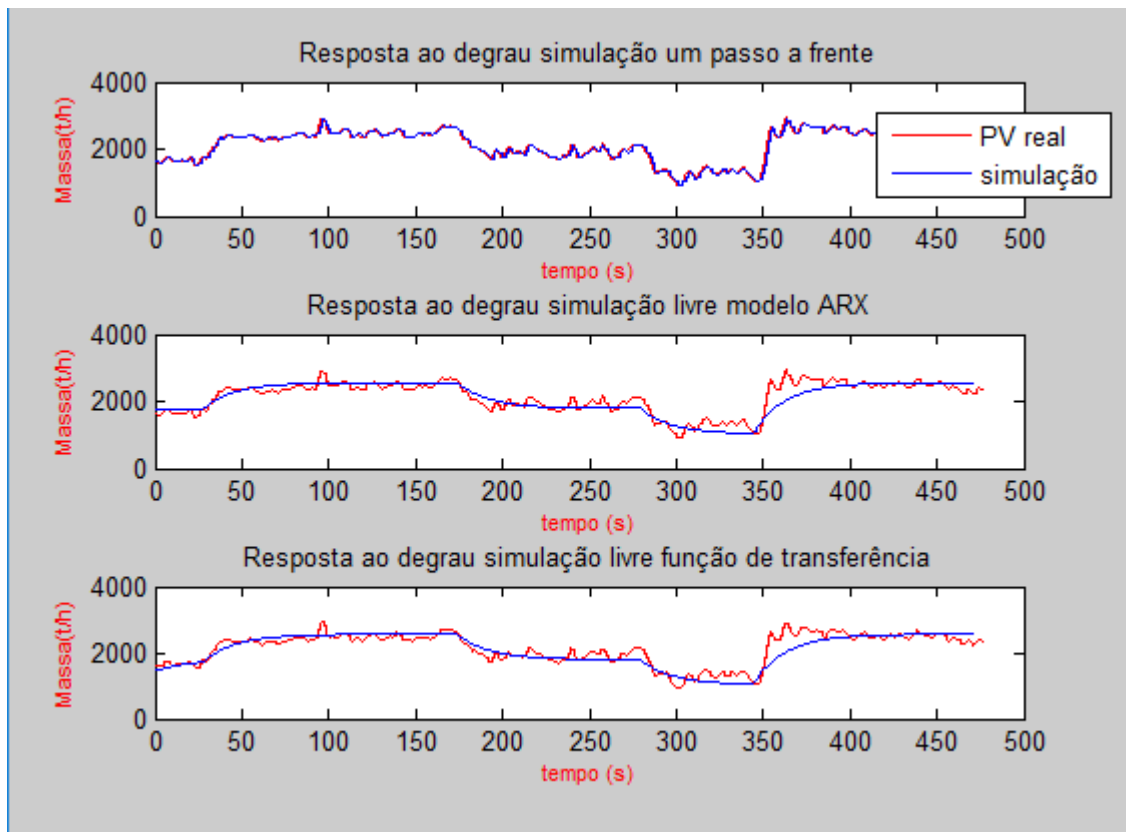


Figura 15 - Simulação um passo à frente, simulação livre com modelo discreto ARX e simulação livre com modelo contínuo usando uma função de transferência representando a malha de controle FICTC1211AA01.

A Figura 15 representa os testes efetuados utilizando os parâmetros estimados no método de mínimos quadrados. A partir desses parâmetros foi possível obter um modelo matemático de função única para explicar a dinâmica desse sistema. Neste caso está sendo representado uma função de transferência e um modelo ARX. Após os testes de simulação do modelo, outra base de dados foi utilizada para realizar a validação do modelo. Nessa simulação é importante observar a similaridade entre os modelos discreto ARX e o contínuo na forma de função de transferência.

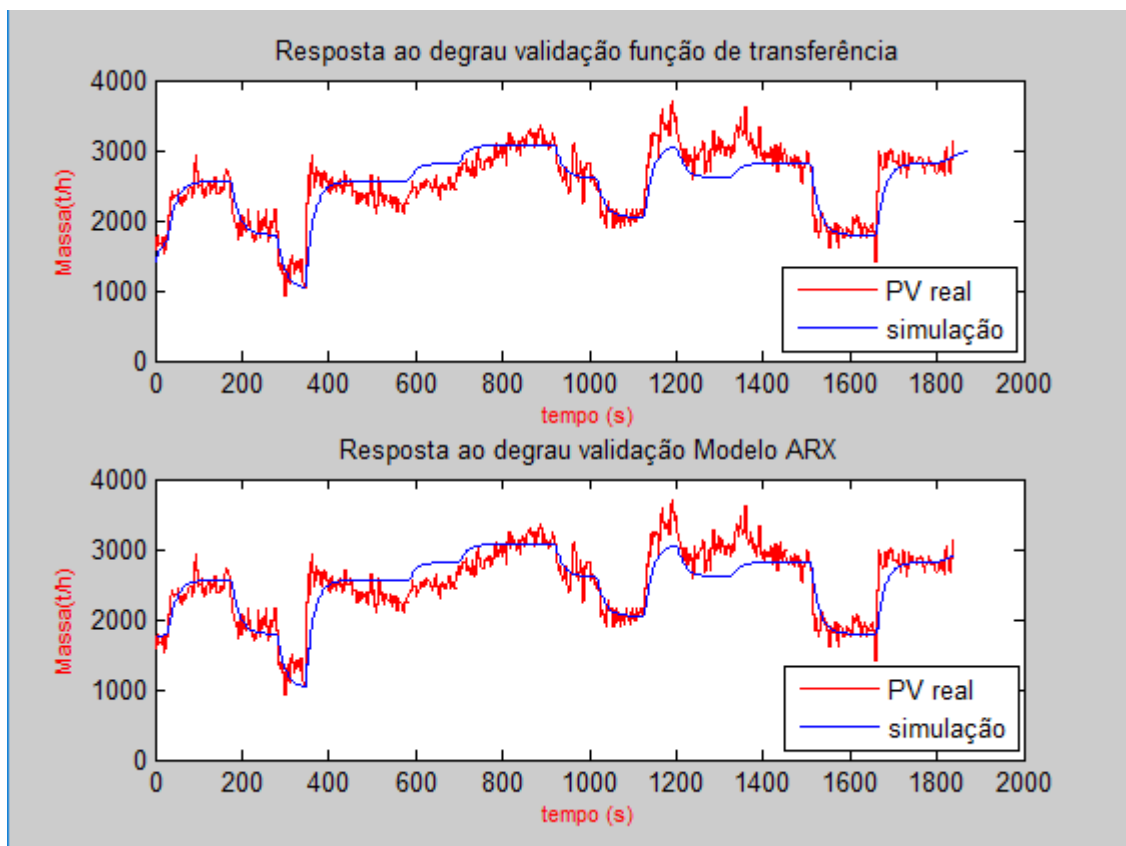


Figura 16 - Testes de Validação dos modelos matemático da malha de controle FICTC1211AA01, onde é possível observar a similaridade entre os modelos com os dados de validação.

Foram selecionados outros dados da variável de processo para validação do modelo. Na Figura 16, os resultados obtidos pela função de transferência e pelo modelo ARX são comparados com os dados coletados da planta.

4.1.1 Aplicação do modelo no PLC

Atualmente é comum nas indústrias que os equipamentos da planta, como também todas as malhas de controle sejam controladas por meio de um microcomputador industrial conhecido como PLC (*programmable Logic Controller*). De acordo com o avanço tecnológico desses controladores é possível programar um modelo matemático capaz de representar a dinâmica do processo, cuja variação de valor pode ser utilizada para controle de outras variáveis.

O modelo matemático obtido pelas técnicas de identificação foi programado no PLC. O objetivo é ter a maior assertividade na representação da dinâmica do sistema. Dentre as características desse sistema, o tempo de resposta deve ser considerado para criação de um *buffer* circular, onde a PV terá uma resposta no mesmo tempo da variável do modelo.

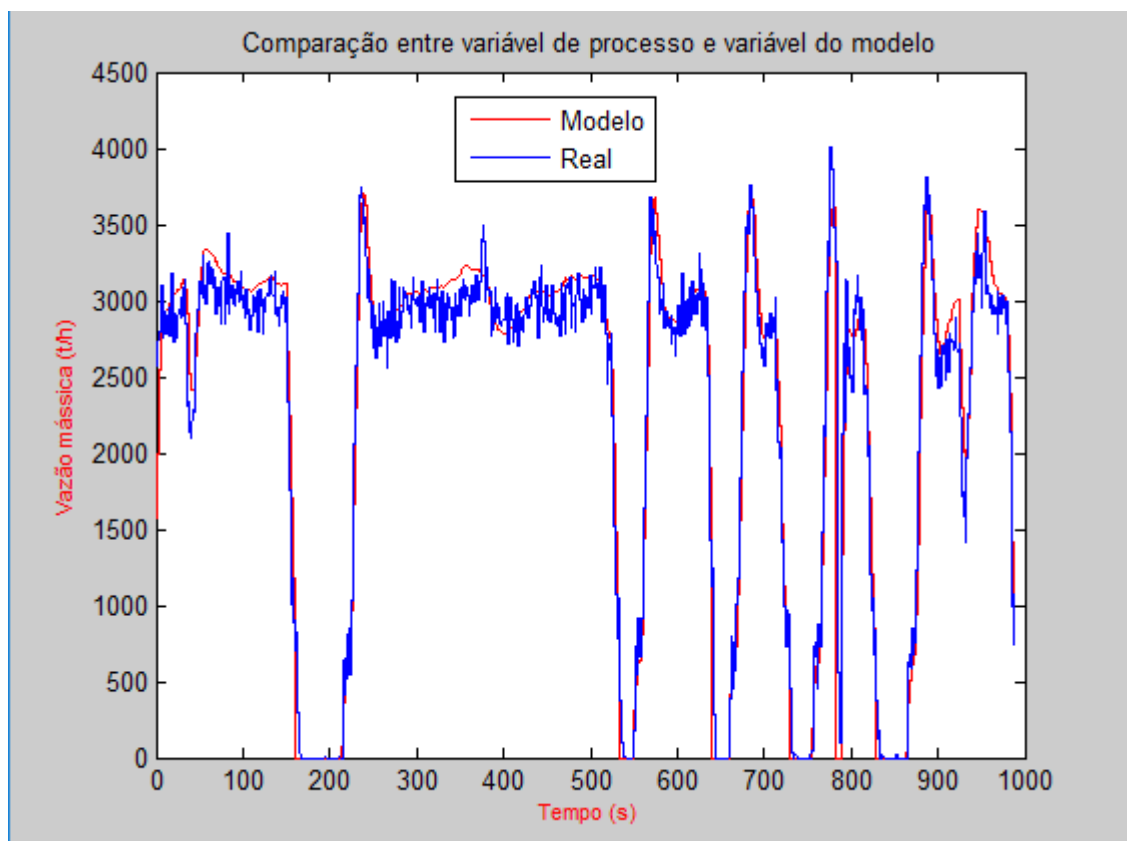


Figura 17 - Comparação entre o sinal gerado pelo modelo implementado no PLC com a variável do processo PV, com intuito de avaliar a correlação entre os dados.

Como um dos principais objetivos do modelo é obter valores mais próximos do real para representar a dinâmica do sistema, a Figura 17 representa essa avaliação. Os dados foram

extraídos do sistema PIMS, onde as regras de compressão e exceção são as mesmas para as duas variáveis. Aplicando uma análise de correlação nesse período, aproximadamente 98% dos dados do modelo podem explicar a variável do sistema. Neste caso, considera-se uma forte correlação e entende-se que o modelo matemático pode ser usado no sistema de predição.

4.2 Malha de controle com compensador de tempo morto

O preditor de Smith utiliza a saída do modelo matemático para compensar o atraso puro de tempo. Considerando um modelo matemático com o mesmo atraso puro de tempo do processo tendo respostas idênticas, o retorno do sinal na realimentação em malha fechada será a resposta do modelo desconsiderando o atraso puro de tempo. Dessa forma, a resposta pode ser suavizada minimizando o *overshoot* da malha de controle e melhorando a sua estabilidade.

A malha de controle da planta em questão é feita por um controlador PI. Sendo que, para os testes do modelo, foi definida a seguinte estrutura para representar a planta sem o preditor de Smith nas simulações:

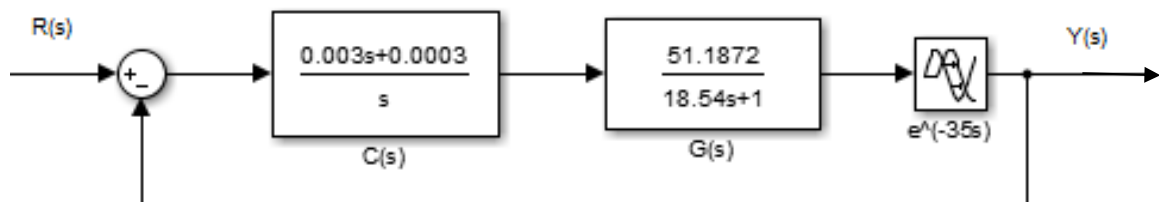


Figura 18 - Diagrama de bloco da malha de controle FICTC1211AA01 antes da implementação do preditor de Smith.

A malha de controle FICTC1211AA01 trabalhava com um controlador PI, tendo um ganho $K=0.003$ e tempo integral $T_i=10$. A Figura 18 representa o diagrama de bloco dessa malha de controle, sendo que, para essa representação, os parâmetros da função de transferência de $G(s)$ foram adquiridos por meio de técnicas de identificação de sistemas aplicados nesse trabalho.

Várias técnicas de controle já foram aplicadas para essa malha, cujos parâmetros de K e T_i foram definidos utilizando o *PlantTriage*. O *PlantTriage* é um software utilizado para definir parâmetros e avaliar o desempenho de malhas de controle de acordo com a estratégia de

atuação. Devido a existência de um atraso considerável na resposta do sistema, a estratégia definida para essa malha de controle foi mais conservadora. O principal objetivo dessa estratégia era minimizar o *overshoot* na resposta do sistema com o menor impacto na produção.

Neste trabalho optou-se por implementar o preditor de Smith na malha de controle FICTC1211AA01 com as sintonias antigas no controlador. O objetivo é observar as melhorias com a implementação de um compensador de tempo morto no sistema, e, posteriormente, realizar outras tentativas de melhorias.

A função de transferência em malha fechada sem levar em conta o preditor de Smith é $\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)P(s)}$, onde $P(s) = G(s)e^{-35s}$. O objetivo é compensar esse tempo morto no sistema utilizando o preditor de Smith apresentado na seguinte estrutura:

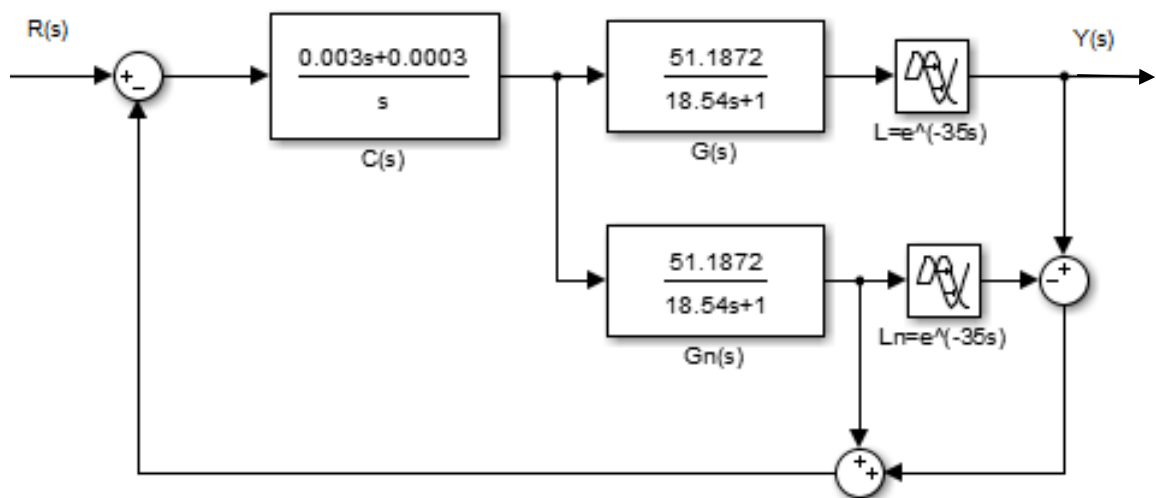


Figura 19 - Diagrama de bloco proposto para a malha de controle FICTC1211AA01 com preditor de Smith como compensador de tempo morto.

A função de transferência em malha fechada do diagrama de bloco da Figura 19 é $\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)[P(s)+Gn(s)-Gn(s)e^{-Lns}]}$, note que se o tempo morto do modelo for igual ao tempo morto do processo, a equação característica compensa a ação do tempo morto da planta com a ação do tempo morto do modelo, restando apenas a resposta imediata do modelo na realimentação da malha.

4.2.1 Análise da resposta no domínio do tempo

O modelo pode ser avaliado a partir da sua resposta temporal. O objetivo é efetuar a comparação das respostas no domínio do tempo entre as malhas de controle, com e sem o preditor de Smith. Para isso, a entrada do sistema foi excitada com uma entrada ao degrau unitário.

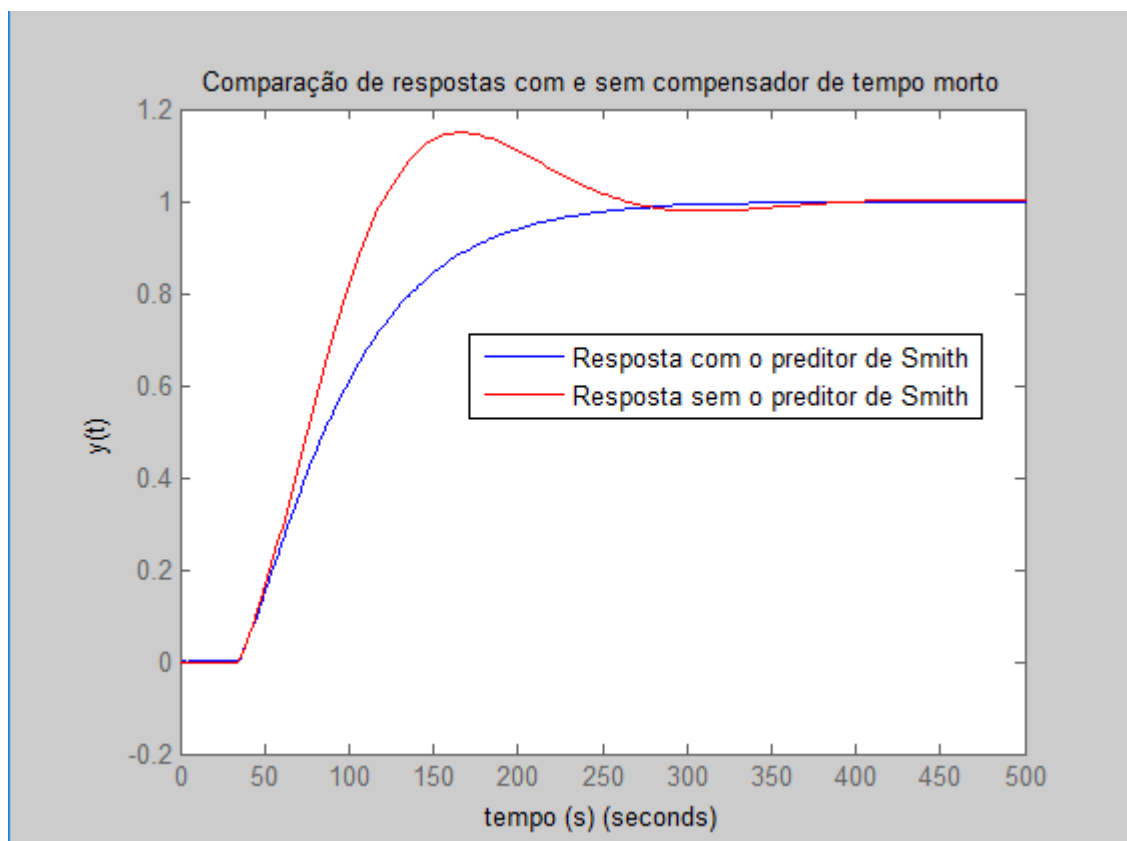


Figura 20 - Simulação de comparação entre as respostas do sistema com e sem o preditor de Smith para entrada ao degrau.

De acordo com a simulação da Figura 20, percebe-se que o sistema que possui um compensador de tempo morto tem uma resposta suavizada. É importante observar que o tempo de acomodação não altera. Além do teste com degrau unitário é importante avaliar o modelo com dados reais de processo.

Para avaliar o desempenho do modelo, foram coletados 86400 dados reais do sistema contendo os sinais do SP e PV, sendo que esse registro representa o comportamento da malha

de controle FICTC1211AA01. Para facilitar a análise de desempenho do modelo, foram definidos dois momentos dentro deste período para análise da comparação.

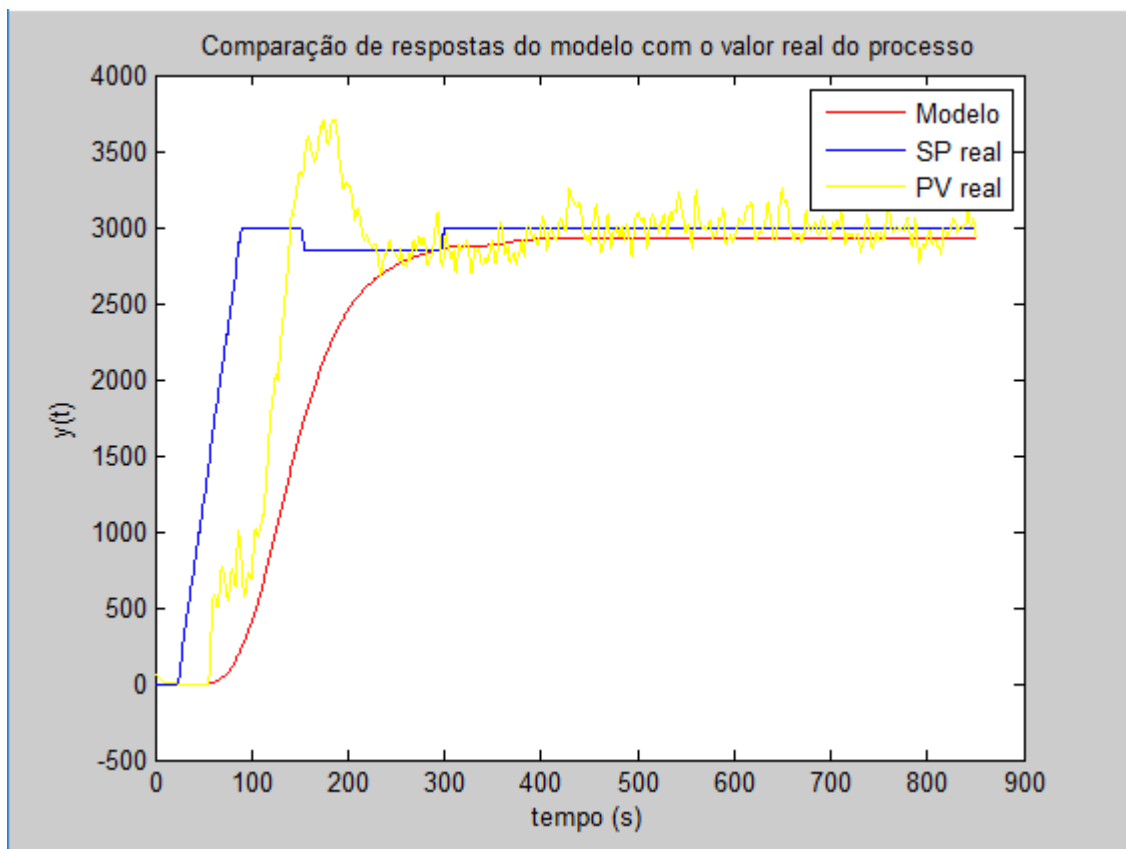


Figura 21 - Comparação entre os dados reais do sistema com a resposta do modelo de predição.

Em vários instantes de operação da malha de controle, o comportamento nas Figuras 21 e 22 se repetem. Dessa forma foi possível avaliar o comportamento do modelo diante de variações do SP em operação real.

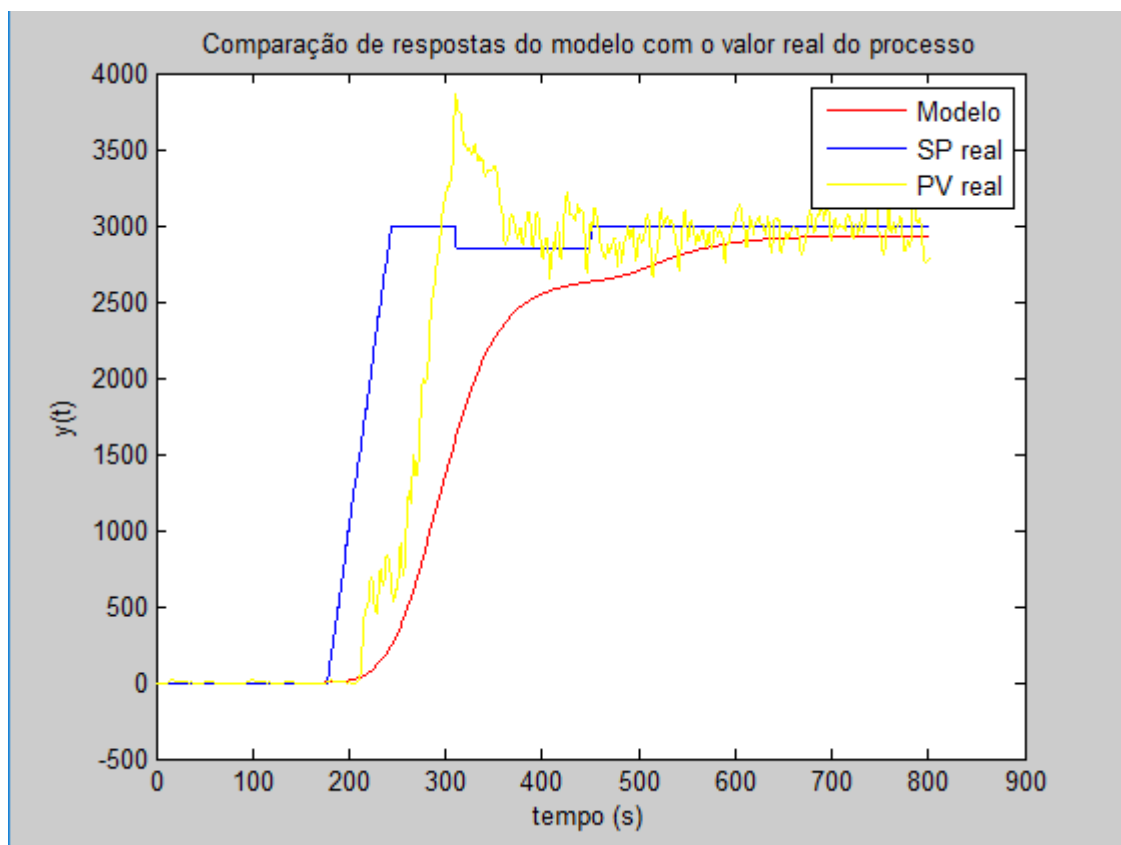


Figura 22 - Comparação entre os dados reais do sistema com a resposta do modelo de predição.

De acordo com a análise das Figuras 21 e 22, percebe-se um *overshoot* na resposta do sistema. Dependendo do valor de pico dessa resposta, ocorrem vários desligamentos na planta por proteção de taxa alta de minério na correia transportadora TC1211AA01 ou corrente alta no britador BR1211AA01. Embora o modelo com o preditor de Smith apresente uma resposta favorável ao controle da malha, a implementação desse modelo no PLC também deve ser avaliada.

4.2.2 Aplicação do modelo do preditor de Smith na malha de controle FIC1211AA01

O PLC utilizado para controle da operação de cominuição, onde se encontra programada a lógica da malha de controle FICTC1211AA01, compreende linguagens de programação em *STL*, *Function Block* e *Ladder*. A linguagem de programação mais comum em utilização é o *Ladder*, cujo conhecimento está mais disseminado entre as equipes de manutenção, instrumentação e automação. Devido a esses fatores, a programação da malha de controle FICTC1211AA01 com o preditor de Smith foi elaborada na linguagem *Ladder*.

A estrutura do modelo aplicada na lógica de programação foi o ARX com tempo de amostragem de 1 segundo. Para elaboração do atraso puro de tempo foi utilizada um *buffer* circular, onde foi possível distinguir a resposta imediata do modelo e a resposta com o *delay* de 35 segundos.

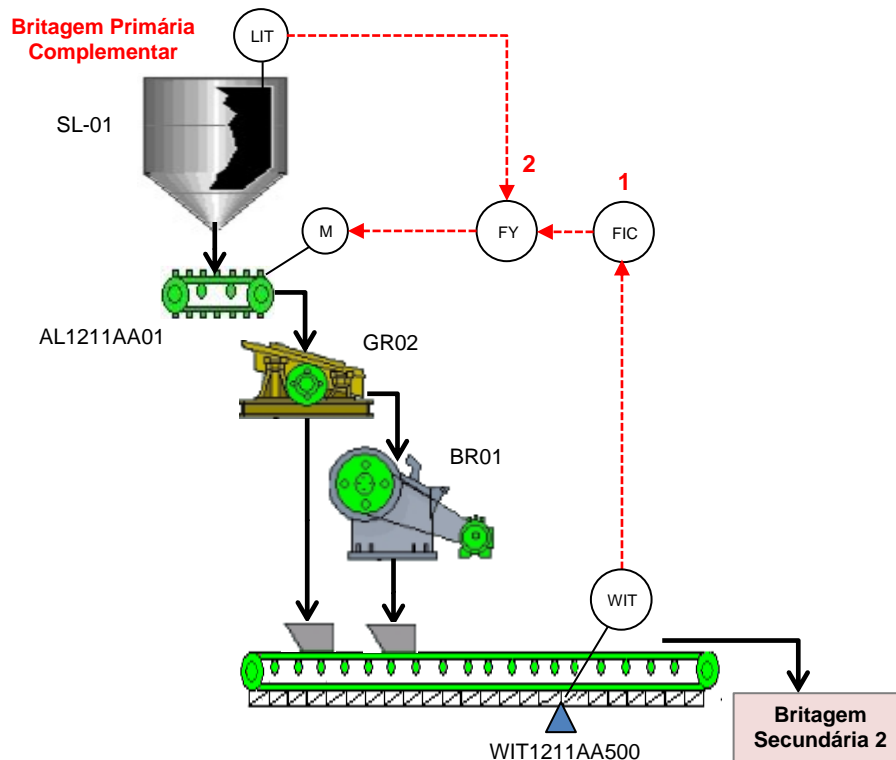


Figura 23 – Estratégia de controle da malha FICTC1211AA01 antes da implementação do preditor de Smith. (1) Malha de controle PID de vazão mássica (t/h) com atuação sobre a velocidade do alimentador. A definição do SP de vazão mássica é feita pelo operador de sala de controle. (2) Malha de controle PID de nível (%) do silo do alimentador. Foi implementada como malha de segurança segundo a estratégia *Override*, onde em momentos de nível baixo, a malha assume o controle sobre a velocidade do alimentador buscando reduzir paradas por intertravamento de nível muito baixo.

-

A Figura 23 representa a estratégia de controle da malha FICTC1211AA01, onde o controlador PI atua na velocidade do motor de acordo com a taxa de minério na balança WIT1211AA01. O valor do nível do silo SL-01 atua como batente lógico, cujo valor define a liberação de funcionamento do AL1211AA01. Como proteção, o nível do silo SL-01 também atua na malha de controle quando ocorre nível baixo no silo. Essa ação é somente para proteção, ou seja, não ocorre em operações normais e não interferiu na implementação do preditor de Smith.

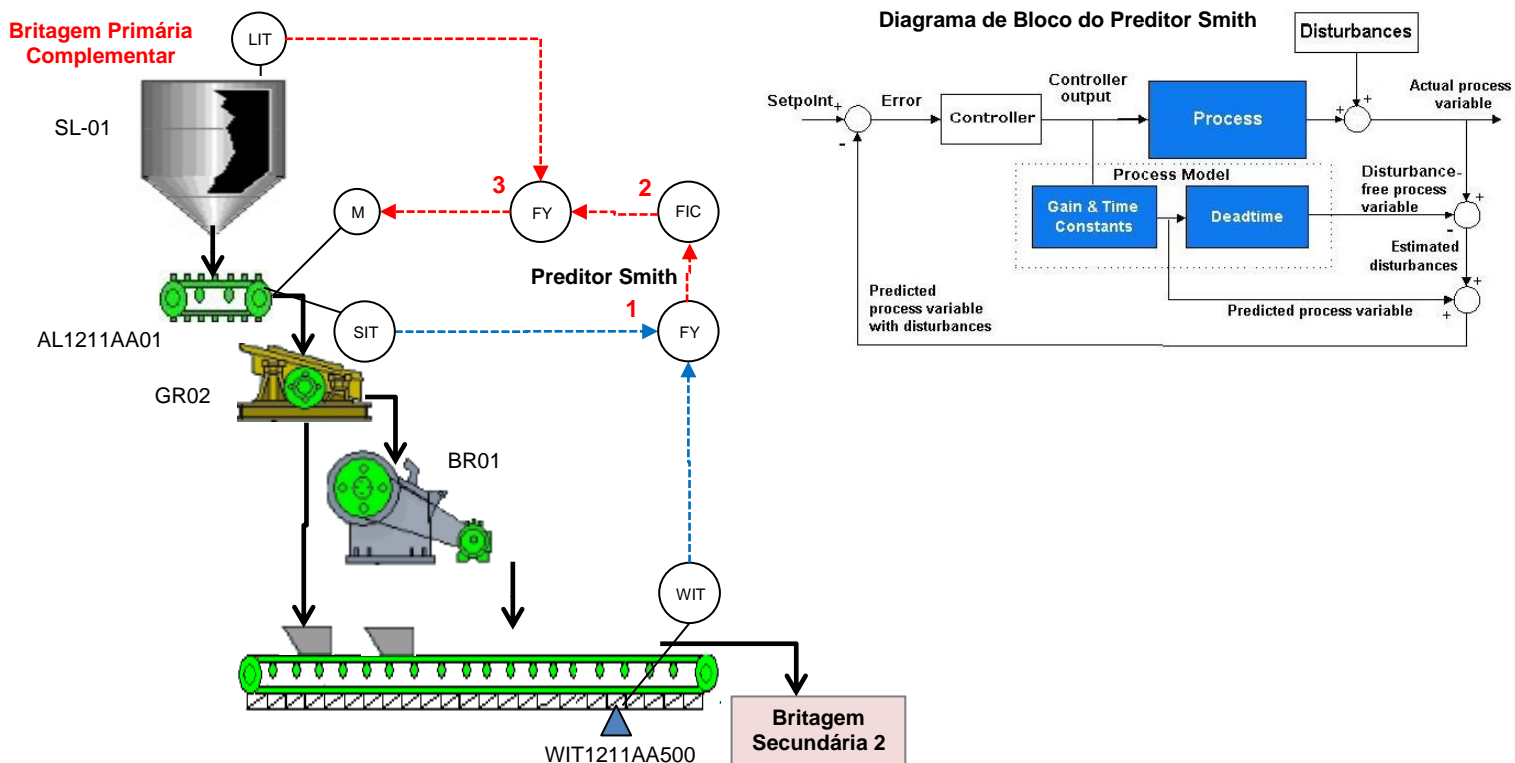


Figura 24 – Proposta da estratégia de controle da malha FICTC1211AA01 com o preditor de Smith. Preditor Smith: (1) Modelo matemático de compensação de tempo morto representativo da dinâmica do processo. A variável de processo (vazão mássica TC1211AA01) é sobrescrita pelo resultado do modelo compensando o atraso da leitura da taxa na balança WIT1211AA500 na resposta transitória da malha. (2) Malha de controle PID de vazão mássica (t/h) com atuação sobre a velocidade do alimentador. A definição do *setpoint* de vazão mássica é feita pelo operador de sala de controle. (3) Malha de controle PID de nível (%) do silo do alimentador. Foi implementada como malha de segurança segundo a estratégia *Override*, onde em momentos de nível baixo, a malha assume o controle sobre a velocidade do alimentador buscando reduzir paradas por intertravamento de nível muito baixo.

Como parte da gestão de malhas de controle, todas as alterações devem ser apresentadas como propostas de controle para a área operacional e de manutenção. A Figura 24 representa a proposta da estratégia de controle na malha FICTC1211AA01 com a implementação do preditor de Smith. O principal objetivo dessa estratégia é evitar o *overshoot* na resposta transitória da malha de controle, dessa forma, os equipamentos não sofrerão com as taxas altas de minério no processo.

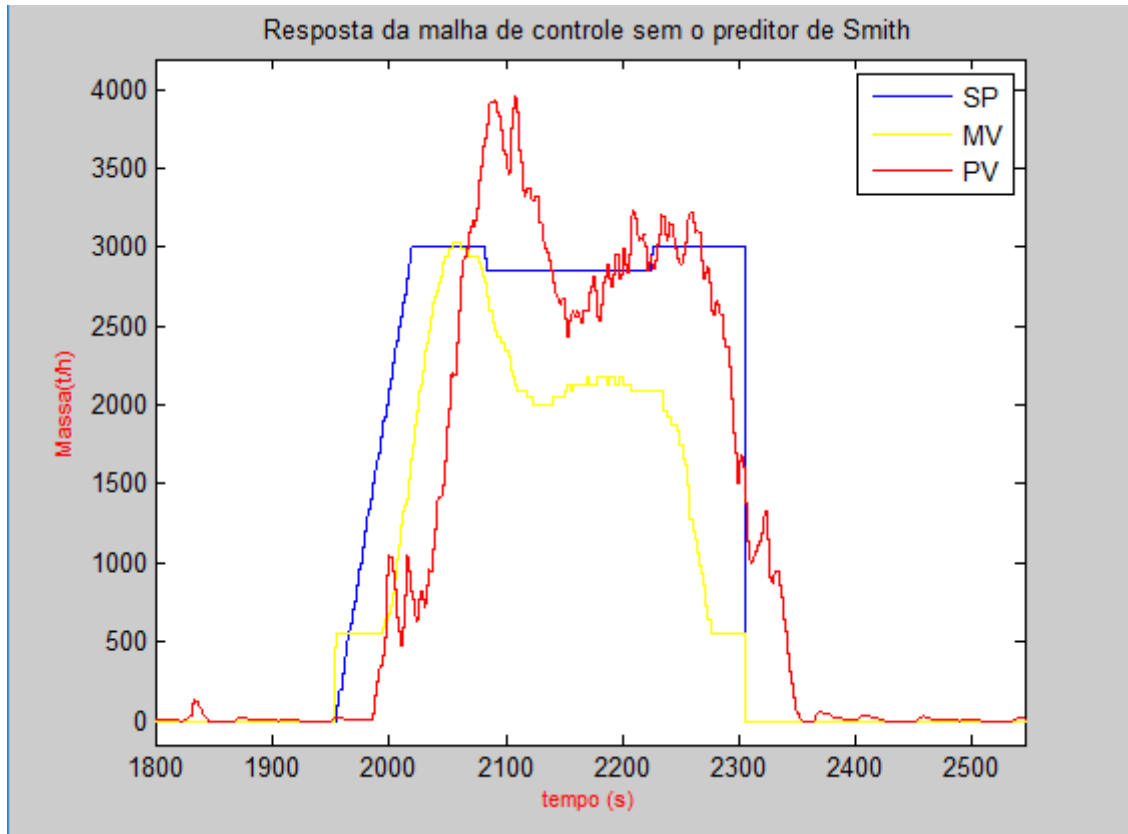


Figura 25 – Resposta da malha de controle sem o preditor de Smith representando um ponto de falha no controle da taxa de minério no processo de cominuição.

A Figura 25 representa a resposta transitória da malha de controle FICTC1211AA01 antes da implementação do preditor de Smith. Percebe-se pelo resultado que ocorre um *overshoot* na resposta transitória da malha, onde o valor de taxa alta de minério ocasiona uma redução do valor do SP devido a uma estratégia de proteção inserida na lógica para evitar a parada do AL1211AA01. Essas variações na PV podem ocasionar a instabilidade da malha e afetar o seu desempenho no processo.

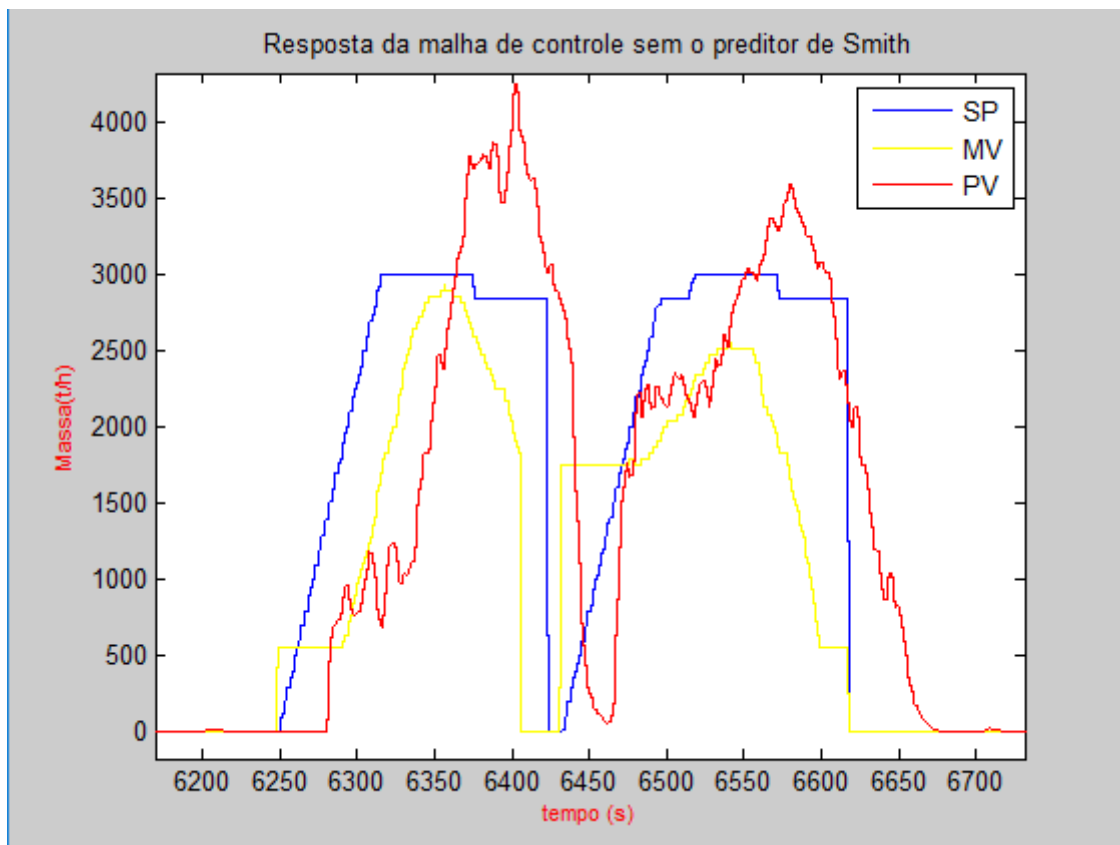


Figura 26 – Resposta transitória da malha FICTC1211AA01 representando a parada do equipamento como proteção por taxa alta de minério.

A estratégia de redução do SP pela taxa de minério na balança WITTC1211AA500 não evita todas as paradas dos equipamentos. Como visto na Figura 26, a taxa de minério atingiu valores maiores do que 4000 t/h. Como o tempo de resposta é predominante nesse processo, a redução do SP não foi eficiente, sendo que essa estratégia não consegue antecipar a resposta do sistema.

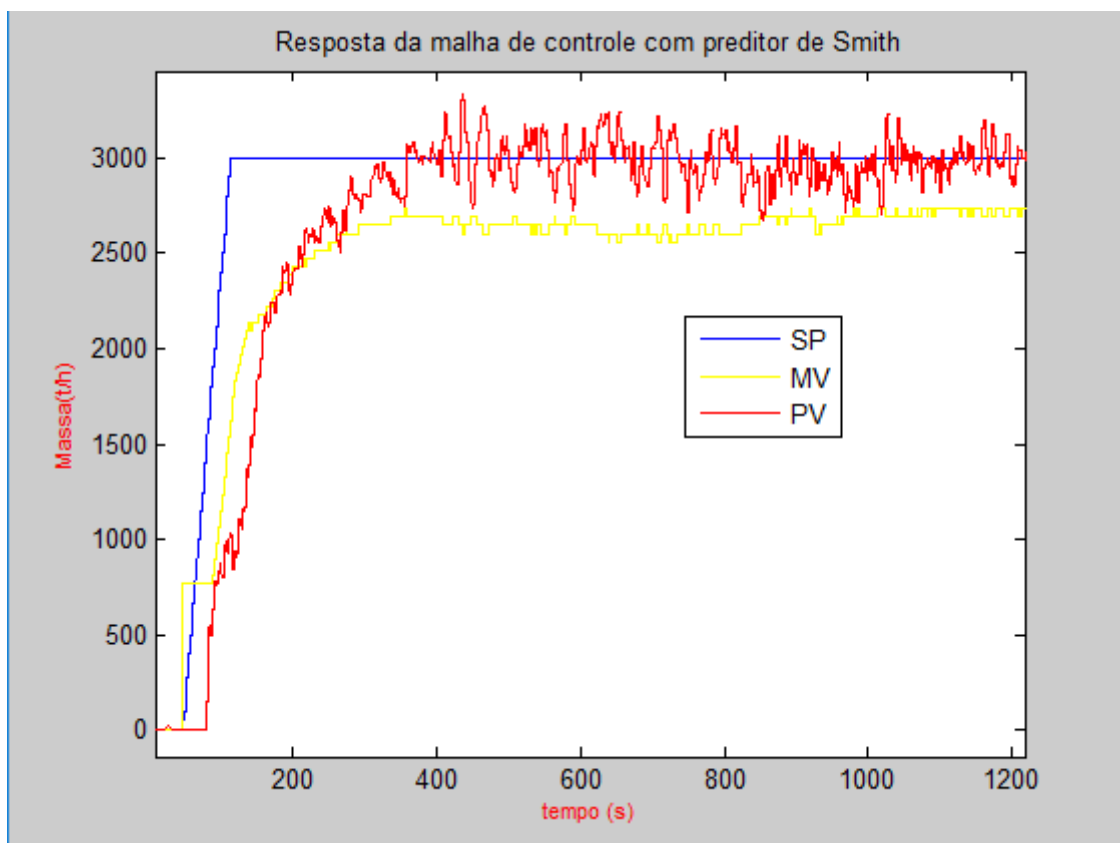


Figura 27 – Resposta da malha de controle FICTC1211AA01 com a implementação do preditor de Smith demonstrando a eliminação do *overshoot* na resposta do sistema e as variações no sinal de entrada do processo (MV).

A proposta da implementação do preditor de Smith na malha de controle FICTC1211AA01 não elimina as proteções existente no processo. Porém, devido aos resultados, novas estratégias podem ser abordadas para melhorar o desempenho do processo. De acordo com a Figura 27, o preditor de Smith implementado na malha FICTC1211AA01 proporciona uma resposta suavizada característico de um sistema sobreamortecido.

O ruído aparente no sinal da resposta da malha de controle é devido a variação do tipo de material extraído na mina. Essa variação impacta na densidade do material, cuja característica heterogenia é percebida na medição da balança WITTC1211AA500. Como a balança utiliza a técnica de medição por peso e velocidade da correia transportadora, naturalmente essa variação de densidade do material medido infere diretamente na medição da taxa de minério.

A variação da densidade do material não impactou na resposta da malha com a implementação do preditor de Smith. Isso foi possível, pois esse sinal não representa a dinâmica do sistema. A escolha da estrutura de um modelo de primeira ordem na identificação

do sistema usando a técnica de mínimos quadrados desconsiderou o ruído causado pela falta de homogeneização do material extraído da mina.

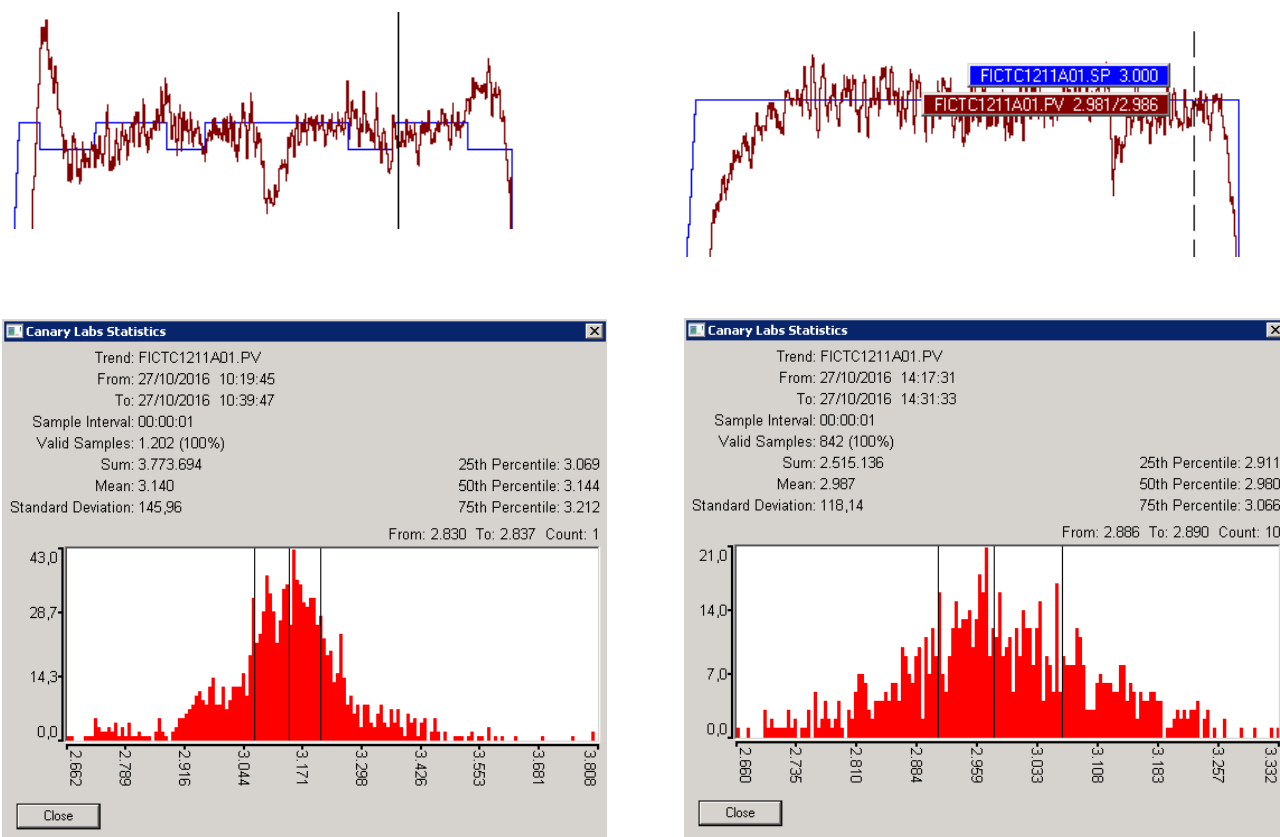


Figura 28 – Análise de variabilidade da malha FICTC1211AA01 antes e depois da implementação do preditor de Smith no PLC.

A Figura 28 representa uma análise de variabilidade da malha de controle FICTC1211AA01 feita pelo software *PlantTriage*. Relativo ao período da análise, a taxa de minério antes da implementação do preditor de Smith atingiu 3808 t/h com um desvio padrão de 145 t/h. Após a implementação do preditor de Smith, o desvio padrão foi de 118 t/h atingindo um valor máximo de 3332 t/h no período analisado.

Outro ponto que pode ser observado na Figura 28 são as variações do SP por proteção de taxa alta de minério para evitar paradas dos equipamentos. As variações observadas no SP da malha de controle antes da implementação do preditor de Smith fazem parte da estratégia de proteção do sistema. Sempre que ocorrem taxas altas de minério, no primeiro momento o SP é reduzido, se caso o sinal da PV continuar alto, o alimentador de sapatas é desligado para

evitar paradas por sobrecargas nos outros equipamentos do processo. A possibilidade dessa ocorrência, praticamente foi eliminada com a implementação do preditor de Smith.

4.2.3 Avaliação da sintonia da malha de controle FIC1211AA01

Após a implementação do preditor de Smith na malha de controle FICTC1211AA01 é importante avaliar o seu desempenho a partir da nova resposta do sistema. De acordo com a avaliação do *PlantTriage*, novos valores dos parâmetros do ganho e da constante de tempo são utilizados para atender a nova estratégia de controle. Como visto nas respostas da malha com a implementação do preditor de Smith, o *overshoot* foi eliminado na resposta transitória da malha. Dessa forma, pode ser adotada uma estratégia de sintonia para uma ação mais rápida no controlador sem extrapolar os limites de segurança do processo.

Após a avaliação de desempenho da malha utilizando o *PlantTriage*, o controlador foi sintonizado com os novos valores de ganho e constante de tempo. A premissa mais importante para a nova sintonia é evitar o *overshoot* na resposta do sistema. A tabela abaixo demonstra a mudança dos parâmetros do controlador.

Tabela 4 – Ajuste dos parâmetros do controlador após implantação do preditor de Smith

Antes da sintonia	Depois da sintonia
Ganho proporcional $k_p = 0,003$	Ganho proporcional $k_p = 0,004$
Tempo integral $t_i = 10s$	Tempo integral $t_i = 15s$

A mudança do tempo integral tem forte influência no regime permanente da resposta do sistema, estando diretamente ligada a melhoria da precisão do sistema. A ação integral possibilitará uma rejeição assintótica das perturbações existentes no sistema, buscando anular o erro em regime permanente no sistema em malha fechada.

A mudança no ganho proporcional tende a anular o erro em regime permanente, porém pode levar a instabilidade da malha. O ganho é proporcional a amplitude do valor do sinal de erro do sistema, dessa forma, se o valor do ganho for muito alto, a cada interação a resposta do sistema poderá se distanciar mais do SP em malha fechada.

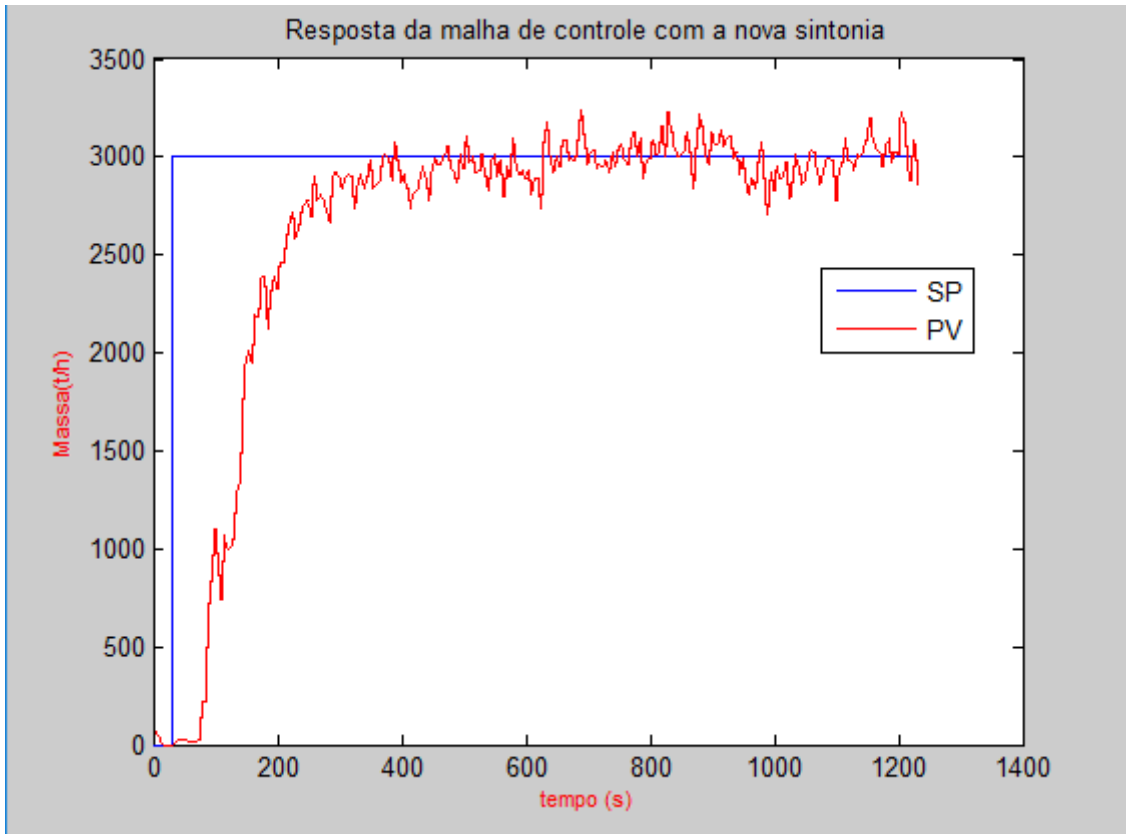


Figura 29 – Resposta da malha de controle FICTC1211AA01 com uma nova sintonia utilizando o *PlantTriage* no sistema com compensador de tempo morto.

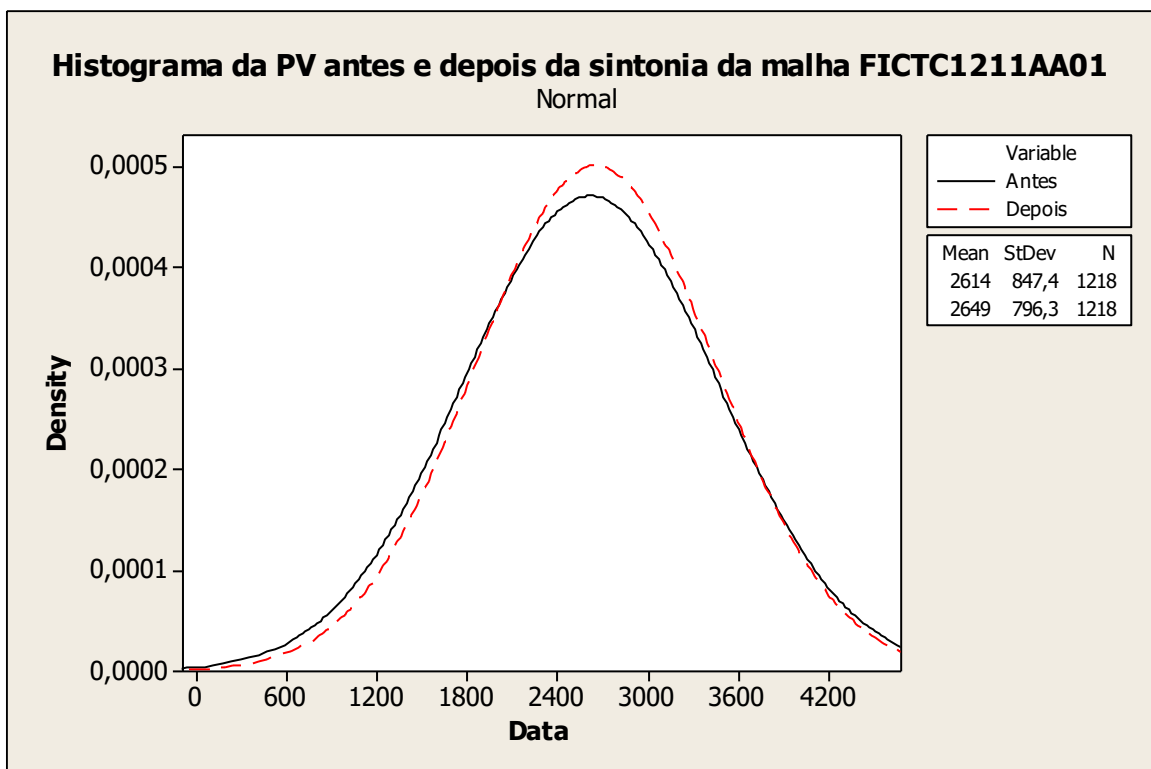


Figura 30 – Comparativo de desempenho entre as respostas da malha de controle FICTC1211AA01 antes e depois da sintonia após implementação do preditor de Smith.

A comparação demonstrada na Figura 30 correspondem aos dados da PV da Figura 27 e da PV da Figura 29, ambos os dados foram adquiridos após a implementação do preditor de Smith. O objetivo da comparação é avaliar as diferenças da implementação com uma nova sintonia nos parâmetros do controlador. Na Figura 27, os dados representam a resposta do sistema com a implementação do preditor de Smith com a sintonia antiga. Na Figura 29 os dados representam a resposta do sistema com a implementação do preditor de Smith com a nova sintonia. Esses dados compreendem tanto a resposta transitória quanto a resposta permanente do sistema, onde se percebe um aumento na taxa média e uma diminuição no desvio padrão.

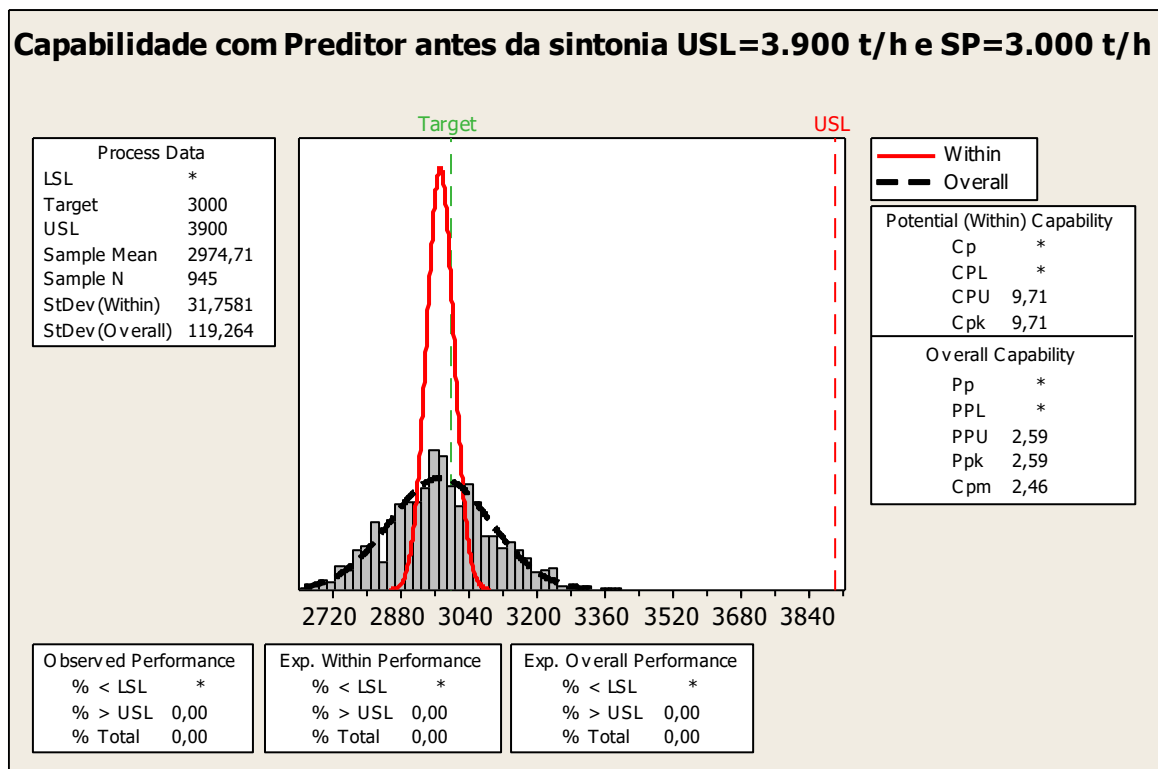


Figura 31 – Análise de capacidade dos dados da malha de controle FICTC1211AA01 com o preditor de Smith somente em regime permanente antes da sintonia.

A análise de capacidade de um processo avalia a sua habilidade em atingir as especificações e tolerâncias definidas no processo. Uma premissa para essa análise é ter uma amostragem do processo numa faixa estável, como também a definição clara dos limites do processo. Para a análise de capacidade são usados os dados extrapolados nos limites superiores de tolerância e o desvio padrão obtivo pela distribuição dos dados.

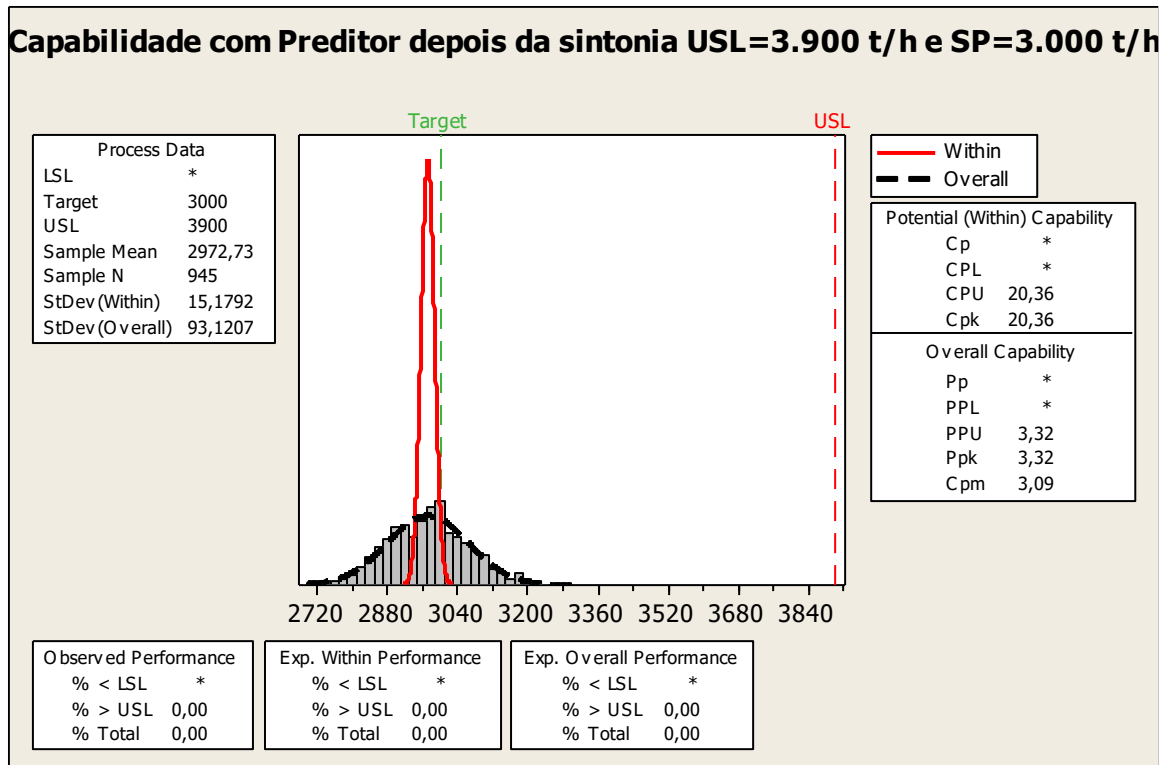


Figura 32 - Análise de capacidade dos dados da malha de controle FICTC1211AA01 com o preditor de Smith somente em regime permanente antes da sintonia.

Comparando os resultados de capacidade antes e depois da sintonia da malha de controle FICTC1211AA01, representados nas Figuras 31 e 32, percebe-se que após a sintonia, a malha de controle aumentou a sua capacidade em atingir os valores mais próximos da sua tolerância. Essa é uma evidência do desempenho em regime permanente, cuja variação está mais próxima de atingir o erro nulo.

Percebe-se que a nova sintonia diminuiu o erro em regime permanente. Como consequência da nova sintonia, o controle da malha diminuiu o desvio padrão sem alterações significativas na taxa média da PV. Com esses resultados, espera-se um ganho em produtividade, pois o equipamento irá fornecer uma mesma quantidade de minério em menos tempo sem riscos de paradas por taxa alta.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposta a implementação de um compensador de tempo morto baseado no preditor de Smith em um sistema de primeira ordem com atraso. O preditor de Smith foi implementado na malha de controle de um processo de cominuição em uma mineradora, sendo controlada a velocidade de um alimentador de sapatas para atender uma taxa de minério de ferro dentro dos limites dos equipamentos. Em conjunto com o preditor de Smith foi considerado também um controlador proporcional integral (PI).

O modelo matemático do preditor de Smith foi adquirido por meio de técnicas de identificação de sistemas, cujos parâmetros foram definidos utilizando a técnica de mínimos quadrados. As simulações foram realizadas com representações em função de transferência e modelo ARX. A similaridade dos resultados nas duas representações facilitou a análise e a implementação do modelo no PLC.

Os resultados mostraram que a implementação do preditor de Smith melhorou o desempenho da malha FICTC1211AA01. Os objetivos deste trabalho foram atingidos, tendo em vista que, com a eliminação do *overshoot* da resposta transitória não ocorrerão eventos por taxa alta de minério, como:

- Desligamentos dos equipamentos;
- Sobrecarga do sistema;
- Instabilidade da malha;

A partir dos resultados iniciais proporcionados pelo preditor de Smith, a sintonia da malha de controle FICTC1211AA01 foi reavaliada com o intuito de melhorar a constante de tempo e ganho do controlador. Com o compensador de tempo morto, a malha poderá ter uma atuação mais rápida. Dessa forma, a produtividade desse processo foi aumentada, provavelmente irá colaborar com a diminuição da fila de caminhões que basculam na britagem complementar.

Portanto, conclui-se que, o preditor de Smith é um excelente compensador de tempo morto em malhas de controle com o tempo de resposta predominante. É imprescindível que o modelo matemático represente a dinâmica do sistema, onde o preditor antecipa a resposta para uma atuação mais rápida do controlador.

5.1 Trabalhos Futuros

Diante dos resultados da implementação do preditor de Smith, sugere-se a realização de sintonias de malha de controle considerando a utilização do compensador de tempo morto. A maioria das malhas de controle possui atraso na resposta, que são compensadas pela sintonia do controlador.

Diante dos avanços tecnológicos, principalmente na área da computação e eletrônica embarcada nos equipamentos, a identificação de sistemas e a utilização de modelos matemáticos nas indústrias podem ser mais exploradas.

REFERÊNCIAS

ABE, N. YAMANAKA, K. Smith Predictor Control and Internal Model Control – A Tutorial. **SICE Annual Conference in Fukui**, Agosto 4-6, 2003.

AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas: Técnicas lineares e não lineares**. Belo Horizonte: UFMG, 2015.

ALVES, J. L. L. **Instrumentação, controle e automação de processos**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

CHAVES, A. P. **Teoria de prática no tratamento de minério**. São Paulo: Signus Editora, 2002.

CAMPOMAR, G. CAPUCCHIO, L. LUCCHESI, A. **Smith predictor implementation in a PLC, a lab experience**. Facultad Regional San Nicolas – UTN, 2015.

DORF, R. C, BISHOP, R. H. **Modern control system**: Tradução Bernardo Severo da Silva Filho. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científico, 2001.

HAGGLUND, T. An Industrial Dead-Time Compensating PI Controller. **Control Eng. Practice, Vol. 4, No. 6, pp. 749-756**, 1996.

LANDAU, I, D. ZITO, G. **Digital Control System: Design, Identification and Implementation**. Lab. d'Automatique de Grenoble, 2005.

MARCONI, M. A, LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 1991.

MORAES, C, C. **Engenharia de automação industrial**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

SANTACESARIA, C. SCATTOLINI, R. Easy Tuning of Smith Predictor in Presence of Delay Uncertainty. **Automática, Vol. 29, No, 6, pp. 1595-1597**, 1993.

TOZONI-REIS, M. F. C. **Metodologia da pesquisa**. Curitiba: IESDE Brasil S.A., 2009.