



**INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RAFAEL DAMASCENO XAVIER DE BRITO**

**CONTROLE PREDITIVO NA OTIMIZAÇÃO DE MOAGEM DE CARVÃO NA USINA DE  
PELOTIZAÇÃO 4 DA SAMARCO MINERAÇÃO**

Guarapari

2024

RAFAEL DAMASCENO XAVIER DE BRITO

**CONTROLE PREDITIVO NA OTIMIZAÇÃO DE MOAGEM DE CARVÃO NA USINA DE  
PELOTIZAÇÃO 4 DA SAMARCO MINERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Ricardo de Oliveira Bento

Guarapari

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Instituto Federal do Espírito Santo – *Campus* Guarapari

B862 Brito, Rafael Damasceno Xavier de

Controle preditivo na otimização de moagem de carvão na usina de  
pelotização 4 da Samarco Mineração / Rafael Damasceno Xavier de Brito. –  
2024.  
63 f.

Orientador (a): Fabio Ricardo de Oliveira Bento  
Monografia (Graduação) – Instituto Federal do Espírito Santo, Campus  
Guarapari, Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2024.

1. Ferros – Minas e mineração. 2. Indústria mineral. 3. Controle preditivo.  
I. Bento, Fabio Ricardo de Oliveira. II. Instituto Federal do Espírito Santo. III.  
Título.

CDD: 621.3


**RAFAEL DAMASCENO XAVIER DE BRITO**

**CONTROLE PREDITIVO NA OTIMIZAÇÃO DE MOAGEM DE CARVÃO NA USINA DE PELOTIZAÇÃO 4 DA SAMARCO MINERAÇÃO**


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 19 de Junho de 2024


**COMISSÃO EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **FABIO RICARDO OLIVEIRA BENTO**  
Data: 02/07/2024 08:38:38-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Fabio Ricardo de Oliveira Bento**  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Orientador

Documento assinado digitalmente  
 **LEONARDO DE ASSIS SILVA**  
Data: 02/07/2024 08:43:25-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Msc. Leonardo de Assis Silva**  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Examinador

Documento assinado digitalmente  
 **DIEGO NUNES BERTOLANI**  
Data: 02/07/2024 13:47:59-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Diego Nunes Bertolani**  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à empresa Samarco Mineração e às pessoas que estiveram ao meu lado durante esta jornada acadêmica desafiadora, contribuindo de maneira significativa para o sucesso deste trabalho. Primeiramente, quero expressar minha profunda gratidão aos engenheiros Luciano França Rocha e Thiago de Andrade Machado, que gentilmente compartilharam seus conhecimentos e experiências ao longo deste projeto. Suas orientações e insights foram inestimáveis e desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço sinceramente pela generosidade e disposição em dedicar seu tempo e expertise para me ajudar a alcançar meus objetivos acadêmicos. Não posso deixar de expressar minha gratidão aos meus superiores na empresa Cezar Valadares, Luiz Claudio Silva, Luiz Felipe Rodrigues e Renato Gonçalves, cujo apoio inabalável foi fundamental para conciliar minhas responsabilidades profissionais com os compromissos acadêmicos. Sua compreensão e flexibilidade foram essenciais durante os períodos em que precisei me ausentar para concluir meus estudos. Agradeço sinceramente pela confiança depositada em mim e pelo ambiente propício que proporcionou meu crescimento profissional e acadêmico. Por fim, gostaria de estender meu mais profundo agradecimento à minha família e minha amada esposa. Suas incessantes palavras de encorajamento, apoio emocional e compreensão ao longo desses anos desafiadores foram verdadeiramente inspiradoras. Agradeço por estarem ao meu lado em todos os momentos, mesmo nos momentos mais difíceis, e por serem minha fonte constante de força e motivação. A todos vocês, minha mais profunda gratidão. Este trabalho não teria sido possível sem o apoio, orientação e amor de cada um de vocês.

## RESUMO

A indústria de mineração desempenha um papel crucial na economia global, sendo essencial na produção de minério de ferro. Na Samarco Mineração, a busca por eficiência operacional e otimização dos processos é fundamental para manter a competitividade. O carvão, usado como insumo na pelotização, fornece o calor necessário para a formação das pontes de escória e reduz o consumo de óleo combustível, um dos maiores custos no processo de endurecimento das pelotas. Este trabalho visa aprimorar a taxa média de alimentação do moinho de carvão da Usina 4 de Pelotização, com foco na eficiência, redução de custos e aumento da produção. A estratégia utilizada será a implementação de controle preditivo para otimizar continuamente a operação do moinho de carvão na Usina 4 de Pelotização, localizada em Anchieta, Espírito Santo.

Palavras-chave: Mineração, Controle Preditivo, Carvão, Moinho.

## **ABSTRACT**

The mining industry plays a crucial role in the global economy, being essential in iron ore production. At Samarco Mineração, the pursuit of operational efficiency and process optimization is fundamental to maintaining competitiveness. Coal, used as an input in pelletizing, provides the necessary heat for the formation of slag bridges and reduces the consumption of fuel oil, one of the major costs in the pellet hardening process. This work aims to improve the average feed rate of the coal mill at Pelletizing Plant 4, focusing on efficiency, cost reduction, and increased production. The strategy employed will be the implementation of predictive control to continuously optimize the operation of the coal mill at Pelletizing Plant 4, located in Anchieta, Espírito Santo.

**Keywords:** Mining, Predictive Control, Coal, Mill.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Moinho de Carvão. . . . .	14
Figura 2 – Coque de Petroleo . . . . .	21
Figura 3 – Fluxo de processo da Moagem de Carvão. . . . .	22
Figura 4 – Supervisório da Planta de Moagem de Carvão 4 e seus controles. . . . .	23
Figura 5 – Janela Operacional de duas variáveis manipuladas. . . . .	24
Figura 6 – Ações do Controle Preditivo. . . . .	26
Figura 7 – DCS DeltaV. . . . .	27
Figura 8 – Algoritmo de um controlador PID no ambiente DeltaV. . . . .	28
Figura 9 – Bloco MPC no sistema DeltaV. . . . .	28
Figura 10 – Esquema do bloco MPC no sistema DeltaV. . . . .	29
Figura 11 – Bloco MPC Pro no sistema DeltaV. . . . .	29
Figura 12 – Esquema do bloco MPC Pro no sistema DeltaV. . . . .	30
Figura 13 – Aplicação DeltaV PredictPro . . . . .	31
Figura 14 – Sistema de Controle PID. . . . .	32
Figura 15 – Aplicação DeltaV Insight - Tune . . . . .	34
Figura 16 – MPC aplicado a planta de moagem de carvão . . . . .	35
Figura 17 – Mapa do Processo de Moagem de Carvão . . . . .	36
Figura 18 – Estrutura final dos controladores. . . . .	38
Figura 19 – Janela de Teste do DeltaV Predict . . . . .	39
Figura 20 – Otimização por Solução Ótima . . . . .	40
Figura 21 – Resultado do modelo de pressão . . . . .	40
Figura 22 – Resultado do modelo de temperatura . . . . .	41
Figura 23 – Respostas das variáveis manipuladas, perturbações e restrições em relação a Pressão de Entrada do Moinho (MPC de controle de Pressão)	42
Figura 24 – Respostas individuais das variáveis manipuladas, perturbações e restrições em relação a Pressão de Entrada do Moinho . . . . .	43
Figura 25 – Respostas individuais das variáveis manipuladas, perturbações e restrições em relação a Pressão Diferencial . . . . .	44
Figura 26 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em rela- ção a Válvula da Chaminé . . . . .	45



Figura 27 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Válvula de Retorno . . . . .	45
Figura 28 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Rotação do 06VT013 . . . . .	46
Figura 29 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Válvula de Gás Quente . . . . .	46
Figura 30 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Alimentação do Moinho . . . . .	47
Figura 31 – Respostas das variáveis manipuladas, perturbações e restrições em relação a Temperatura de Saída do Moinho (MPC de controle de Temperatura) . . . . .	47
Figura 32 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Temperatura de Saída . . . . .	48
Figura 33 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Temperatura de Entrada . . . . .	49
Figura 34 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Pressão Diferencial . . . . .	50
Figura 35 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Pressão de Entrada . . . . .	51
Figura 36 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Válvula de Gás Quente . . . . .	52
Figura 37 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Alimentação do Moinho . . . . .	53
Figura 38 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Rotação do 06VT013 . . . . .	54
Figura 39 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Válvula da Chaminé . . . . .	55
Figura 40 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Válvula de Retorno . . . . .	56
Figura 41 – Comparativo dos dados históricos de um período antes da implementação do MPC e após a implementação . . . . .	57
Figura 42 – Controle pelo MPC durante troca de carro de grelha no forno . . . . .	58

Figura 43 – Controle convencional durante troca de carro de grelha no forno . . .	59
Figura 44 – Comparativo ON-OFF do MPC . . . . .	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ganhos da implementação do MPC na planta de moagem de Carvão da Usina 4 . . . . .	57
--	----

## LISTA DE SIGLAS

Ifes	Instituto Federal do Espírito Santo
PID	Proporcional Integral Derivativo
MPC	<i>Model Predictive Control</i> (Modelo de Controle Preditivo)
CNS	Concentrado de Sílica Normal
CLS	Concentrado de Baixa Sílica
CMC	Carboximetilcelulose
CV	<i>Controlled Variable</i> (Variável Controlada)
MV	<i>Manipulated Variable</i> (Variável Manipulada)
DV	Desvio
DCS	<i>Distributed Control System</i> (Sistema de Controle Distribuído)
CLP	Controlador Lógico Programável
MIMO	<i>Multiple input multiple output</i> (Múltiplas entradas e múltiplas saídas)
SISO	<i>Single input Single output</i> (Uma entrada e uma saída)
PCU	Unidade de Processamento do Sistema de Controle
PRBS	<i>Pseudorandom Binary Sequence</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda$  Letra grega lambda

$\int$  Integral

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA . . . . .	16
1.2	OBJETIVOS . . . . .	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> . . . . .	<b>18</b>
2.1	MOAGEM DE CARVÃO . . . . .	18
2.2	ESTRATÉGIAS DE CONTROLE . . . . .	23
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>32</b>
3.1	MALHAS DE CONTROLE DA PLANTA . . . . .	32
3.2	DESENVOLVIMENTO DO MPC . . . . .	34
3.3	RESULTADOS OBTIDOS . . . . .	56
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>63</b>

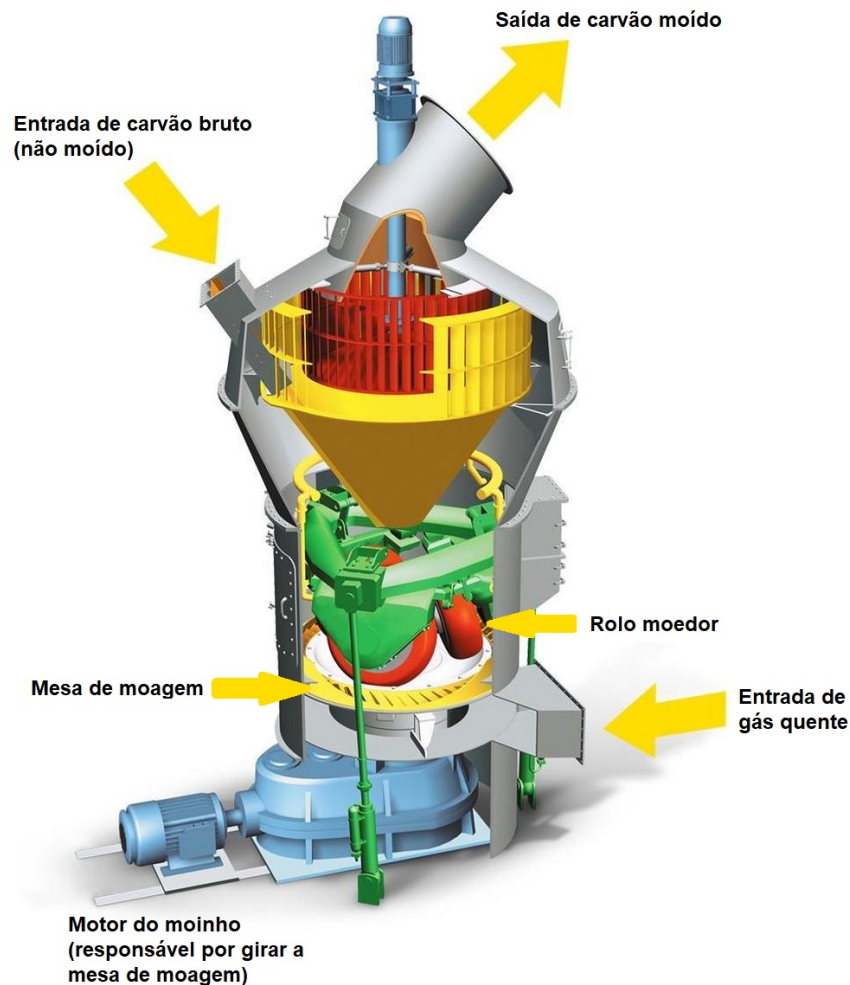
## 1 INTRODUÇÃO

A produção de minério de ferro na forma de pelotas, seu principal produto, e/ou finos de minério, é um processo complexo que envolve diversas etapas, e a qualidade e eficiência de cada uma dessas etapas têm um impacto direto na lucratividade da empresa. Uma das etapas críticas desse processo é a moagem de carvão, um insumo fundamental na produção de pelotas de minério de ferro.

Contudo, a operação eficiente do processo de moagem de carvão é um desafio constante devido às variabilidades naturais e perturbações do ambiente industrial. As oscilações na qualidade do carvão, variações nas condições operacionais e a presença de distúrbios imprevistos podem resultar em um processo de moagem ineficiente, que se traduz em custos adicionais e desperdício de recursos.

O procedimento de moagem do carvão envolve a introdução de um material com alta granulometria em um moinho secador representado pela Figura 1, a fim de ajustá-lo às dimensões necessárias para a subsequente dosagem de insumos nas linhas de mistura. O moinho de carvão em questão é equipado com dois rolos de moagem estacionários e uma mesa rotativa, na qual o material a ser moído é alocado. Os rolos moedores exercem pressão contínua sobre a mesa giratória, resultando na trituração e compressão do material contido no moinho entre a mesa e os rolos. Simultaneamente, um fluxo de gás quente proveniente do forno de endurecimento percorre o moinho de baixo para cima, desempenhando um papel fundamental na secagem e transporte do carvão.

Figura 1 – Moinho de Carvão.



Fonte: (GEBR-PFEIFFER, 2023).

O material que foi previamente seco e moído é transferido por meio de um sistema pneumático para um filtro de mangas, onde ocorre a separação entre o ar e o produto. Após essa separação, o carvão é conduzido por um sistema de transportadores pneumáticos até o silo de dosagem diária.

Para assegurar a eficácia do processo de moagem e secagem do carvão, é fundamental controlar tanto o fluxo quanto a temperatura dos gases envolvidos. A gestão desses parâmetros é realizada por meio de diferentes válvulas. A válvula de gás quente regula o volume de gás proveniente do forno de endurecimento que entra no moinho. A válvula de retorno controla a recirculação dos gases, impactando a pressão na entrada do moinho, com uma leve influência na temperatura de saída, já que o ar recirculado



possui temperatura inferior à do gás do forno. Além disso, a válvula de chaminé regula o volume de gás liberado na atmosfera e, paralelamente, pode ser usada para controlar a pressão na entrada do moinho, que deve permanecer constantemente em níveis inferiores à pressão atmosférica. Finalmente, o ajuste do damper (válvula de amortecimento de fluxo) do ventilador também desempenha um papel relevante na regulação das pressões.

No controle convencional do moinho, apenas as válvulas de retorno e gás quente são manipuladas por controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo). A primeira regula a pressão na entrada do moinho, e a segunda controla a temperatura de saída em malhas independentes. O damper do ventilador permanece fechado durante a partida e, em seguida, é ajustado para 60% enquanto a válvula de chaminé é operada manualmente pelo operador, normalmente mantida em torno de 50% de abertura. A alimentação é controlada por outro PID, visando regular a pressão diferencial do moinho. A pressão diferencial está diretamente relacionada à quantidade de material circulante no moinho, e, quando ultrapassa um limite crítico, pode levar ao "embuxamento". Esta é a condição operacional mais desfavorável, na qual a quantidade de material circulante é suficiente para bloquear o fluxo de gases no moinho, resultando em uma acentuada queda da temperatura de saída, um rápido aumento na pressão diferencial e na vibração do moinho. Nessa situação, existe a possibilidade de violação dos limites de segurança e, conseqüentemente, a interrupção da operação do moinho.

Para enfrentar esses desafios, o Modelo de Controle Preditivo, conhecido como MPC (do inglês, *Model Predictive Control*), tem se destacado como uma abordagem eficaz. O MPC é uma técnica de controle avançada que utiliza modelos matemáticos do processo para prever seu comportamento futuro e, assim, tomar decisões de controle ótimas para minimizar as variabilidades e maximizar o desempenho do processo. Será discutido neste trabalho, como o uso do Controle Preditivo pode mitigar as variabilidades do processo, aumentar a previsibilidade e melhorar o desempenho global.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A moagem de carvão desempenha um papel crucial na Usina 4 de Pelotização da Samarco Mineração, sendo suscetível a múltiplas variáveis, como a composição do carvão, umidade e tamanho das partículas. A variação nesses fatores pode influenciar diretamente a qualidade e quantidade de carvão moído, impactando a produção de pelotas.

Historicamente, os processos industriais eram controlados por métodos convencionais, porém, com o aumento da complexidade, estratégias mais avançadas se tornaram necessárias. Diante dessa evolução, o MPC surge como uma abordagem eficaz para sistemas complexos e multivariáveis. Ao utilizar modelos matemáticos para prever o comportamento futuro do sistema, o MPC ajusta as variáveis de controle, otimizando assim o desempenho do processo. Essa flexibilidade faz do MPC uma escolha atrativa para lidar com a variabilidade inerente à moagem de carvão, possibilitando a redução de custos e o aprimoramento da eficiência operacional.

Este projeto busca aumentar a taxa média de alimentação do moinho de carvão na Usina 4 de Pelotização, visando melhorias significativas na eficiência, redução de custos e aumento na produção de pelotas. A aplicação do MPC possibilita otimizações contínuas na operação do moinho, ajustando consistentemente as variáveis do processo para alcançar a taxa de alimentação desejada. Essa abordagem promissora representa uma resposta estratégica às demandas do ambiente industrial contemporâneo.

## 1.2 OBJETIVOS

Abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

Objetivo Geral:

- Otimizar o processo de moagem de carvão em uma planta de pelotização, focando na redução da variabilidade do processo e no aumento da taxa média de alimentação do moinho, utilizando um otimizador integrado ao sistema de controle distribuído (DCS-Distributed Control System) utilizado pela empresa para controle

da produção.

#### Objetivos Específicos:

- Projetar um MPC para o circuito de moagem de carvão da Usina 4 de Pelotização da Samarco Mineração.
- Demonstrar que controladores robustos asseguram a estabilidade do processo de moagem de carvão e atenuam os impactos da variação dos parâmetros ao longo do tempo.
- Analisar os resultados obtidos da implementação do MPC no processo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 MOAGEM DE CARVÃO

O processo de pelletização pode ser dividido em três fases: preparação das matérias-primas, pelletamento ou formação das pelotas cruas e processamento térmico para produção das pelotas queimadas (MEYER, 1980). Na operação da Samarco, as etapas do processo produtivo incluem:

- Etapa I – Mineração (lavra a céu aberto);
- Etapa II – Concentração do minério por flotação;
- Etapa III – Transporte do minério através de mineroduto;
- Etapa IV – Separação sólido-líquido;
- Etapa V – Pelotização;
- Etapa VI – Estocagem e embarque.

Os minérios de ferro, em sua condição natural, frequentemente não apresentam características adequadas para o processo de pelletização. É imperativo realizar uma preparação do *pellet feed* (partículas finas de minério de ferro, com granulometria abaixo de 0,15 mm), envolvendo o aumento do teor de ferro, a remoção de constituintes indesejáveis e a moagem para atingir uma distribuição granulométrica mais adequada à formação das pelotas cruas. Diversos métodos de beneficiamento estão disponíveis, incluindo separação gravimétrica, lavagem, flotação, bem como separação magnética e eletrostática (MEYER, 1980). Na Samarco, o método empregado é o processo de flotação catiônica reversa, em que o amido atua como depressor e a amina funciona como coletora de partículas de quartzo (SILVA, 2006).

Na unidade de concentração em Mariana, atualmente, são gerados dois tipos de concentrados de minério de ferro: o concentrado de sílica normal (CNS), com um teor máximo de sílica de 1,8%, e o concentrado de baixa sílica (CLS), com um teor máximo

de sílica de 1,0%. O CNS é destinado à produção de pelotas voltadas para alto-forno, demandando uma maior quantidade de ganga (mineral ou conjunto de minerais não aproveitados de um minério) para a formação de escórias. Já o CLS é empregado na fabricação de pelotas direcionadas aos reatores de redução direta.

Os concentrados são conduzidos para a unidade de Ponta Ubu por meio de um mineroduto. Nessa fase, o material é denominado polpa, apresentando um teor médio de sólidos de 70% em massa (com 30% de água). O preparo do material para o pelotamento abrange as etapas de separação sólido-líquido, prensagem do *pellet feed* e incorporação/mistura de insumos essenciais, como carvão, bentonita, calcário e aglomerante orgânico.

Durante a fase de mistura, o *pellet feed*, utilizado no processo de pelotização, recebe a adição dos insumos necessários. Essa etapa é crucial para conferir às pelotas as propriedades físicas, químicas e metalúrgicas requeridas para sua eficácia nos procedimentos subsequentes.

Os elementos essenciais empregados compreendem carvão mineral, calcário calcítico e dolomítico, bentonita e aglomerante orgânico. Esses insumos são introduzidos no *pellet-feed* em proporções apropriadas e, em seguida, combinados por meio de misturadores horizontais, visando alcançar uma homogeneização eficiente do material destinado à alimentação nos discos pelotizadores. Conforme destacado por Meyer (1996), os objetivos primordiais da aplicação desses insumos são:

- **CARVÃO MINERAL:** A incorporação de energia térmica no estágio de endurecimento da pelota resulta em uma diminuição parcial do consumo de óleo combustível do forno. Para além de seu papel crucial como fonte de energia, o carvão desempenha um papel significativo na distribuição adequada de calor durante a fase de queima da pelota. Esse fenômeno não apenas contribui para aprimorar a qualidade física das pelotas, mas também para impulsionar a eficiência do processo, resultando em um aumento de produtividade.
- **CALCÁRIO DOLOMÍTICO E CALCÍTICO:** O calcário desempenha um papel crucial no aumento significativo da resistência das pelotas cruas secas, prevenindo sua degra-

dação durante a fase de secagem no forno de endurecimento. Esses insumos também são responsáveis pela disponibilização de monóxido de cálcio (CaO) e monóxido de magnésio (MgO), essenciais ao processo de endurecimento das pelotas. O CaO desempenha um papel fundamental no processo físico-químico, promovendo a formação de compostos que favorecem a geração de uma ganga ácida em temperaturas mais baixas, fortalecendo a ligação entre os grãos de minério. Por sua vez, o MgO contribui para a melhoria das propriedades das pelotas durante o processo de redução nos altos-fornos, ao formar gangas com pontos de fusão mais elevados. A utilização desses elementos é essencial para conferir à pelota queimada a resistência mecânica e as características metalúrgicas adequadas aos estágios subsequentes do processo.

- **BENTONITA:** A bentonita, um argilomineral, é empregada como aglomerante no processo de formação das pelotas cruas nos discos de pelotização. Sua utilização visa promover a aglomeração a frio das partículas de minério de ferro, facilitando o processo de pelotamento, ao mesmo tempo em que aprimora a resistência da pelota tanto em condições secas quanto úmidas. De origem inorgânica, a bentonita possui elevados teores de sílica, o que contribui para a redução do teor de ferro nas pelotas após a queima.

- **AGLOMERANTE ORGÂNICO:** O aglomerante orgânico apresenta-se como uma escolha atrativa para os processos de pelotização, devido à sua ausência de sílica, o que contribui para o aumento do teor de ferro nas pelotas. O aglomerante orgânico atualmente empregado é uma mistura cuja base é a celulose, comercialmente conhecida como CMC (carboximetilcelulose). A formulação básica inclui dois componentes fundamentais: um polímero, eficaz como imobilizador de água, fornecendo o mecanismo essencial para controlar a taxa de crescimento das pelotas, e um ativador, que sinergicamente trabalha com o ligante, promovendo o uso eficaz do aglomerante e aprimorando as propriedades físicas tanto das pelotas cruas quanto queimadas. Em solução aquosa, o CMC gera uma solução altamente viscosa com um comportamento semelhante a um filme líquido diluído. Esse aspecto é crucial para a formação de uma estrutura adequada na pelota crua, controlando a criação de capilares e o tamanho das pelotas cruas.

O carvão do tipo hulha é uma rocha sedimentar resultante da deposição e carbonização de resíduos vegetais, caracterizando-se por sua dureza e resistência. Mais de 50% de sua composição é constituída por carbono, conferindo-lhe a classificação de carvão de alto teor. Em contraste, outros combustíveis fósseis, como carvões sub-betuminosos com elevado teor de umidade, hulha marrom e linhito, possuem classificações mais baixas. O linhito, o combustível fóssil classificado como o de menor qualidade, situa-se entre a turfa e o carvão em termos de características. Já o coque de petróleo não é um produto natural; trata-se de um subproduto derivado do processo de refino de petróleo como visto na Figura 2. Composto principalmente por carbono, é predominantemente utilizado como combustível. A produção de coque de petróleo segue um processo semelhante àquela do coque obtido a partir do carvão.

Figura 2 – Coque de Petróleo



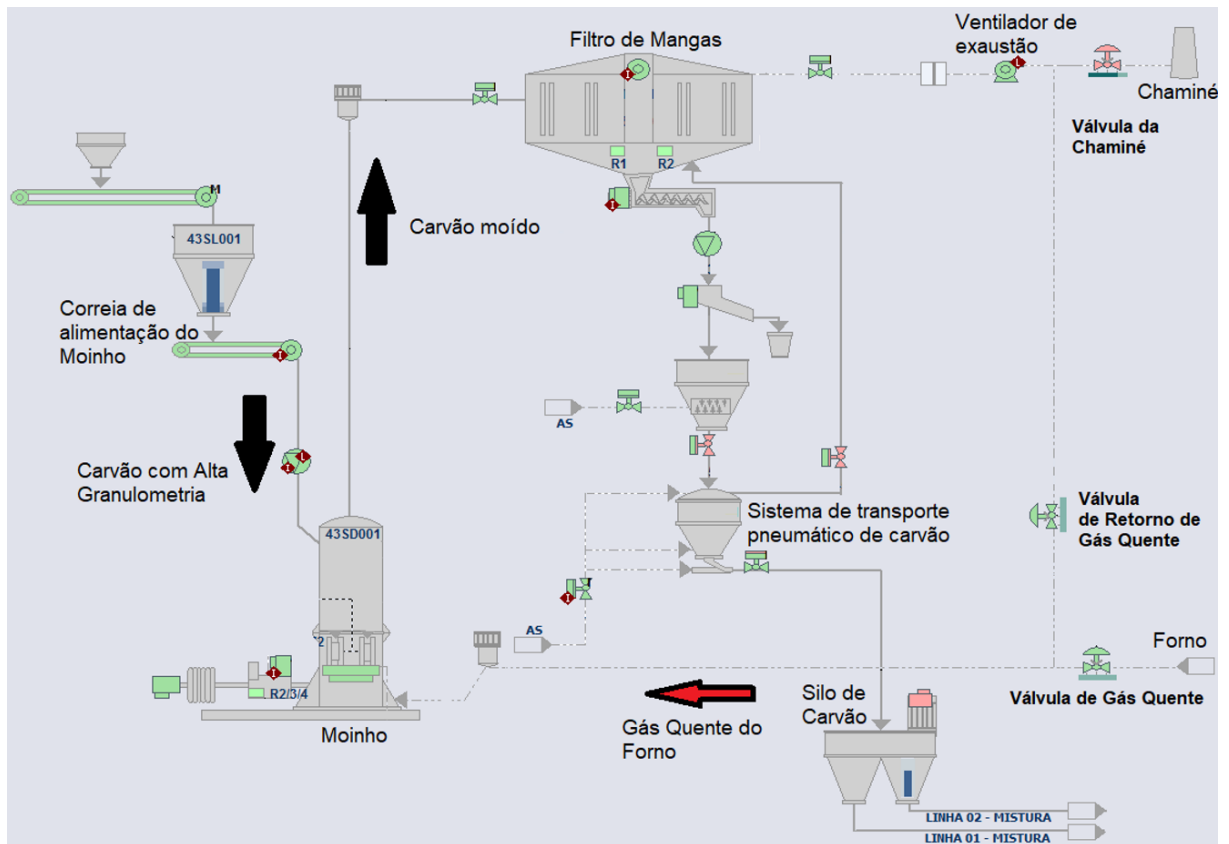
Fonte: Do Autor.

Para utilizar esses produtos de maneira eficaz, visando obter a máxima eficiência de combustão, o rendimento energético mais elevado e, por conseguinte, reduzir ao máximo a emissão de poeira volátil e enxofre, é necessário proceder à moagem do produto até atingir partículas extremamente finas.

A Samarco adota um processo versátil de moagem de carvão sob o ponto de vista da disponibilidade. O fluxograma da Figura 3 mostra que o carvão moído é inserido no moinho através da correia de alimentação. Durante a moagem, um fluxo de gás quente (proveniente do forno) ajuda a secar o carvão e a transportar o material moído para o filtro de mangas, onde é separado e depositado no sistema de transporte pneumático

para ser enviado ao silo da planta de mistura.

Figura 3 – Fluxo de processo da Moagem de Carvão.



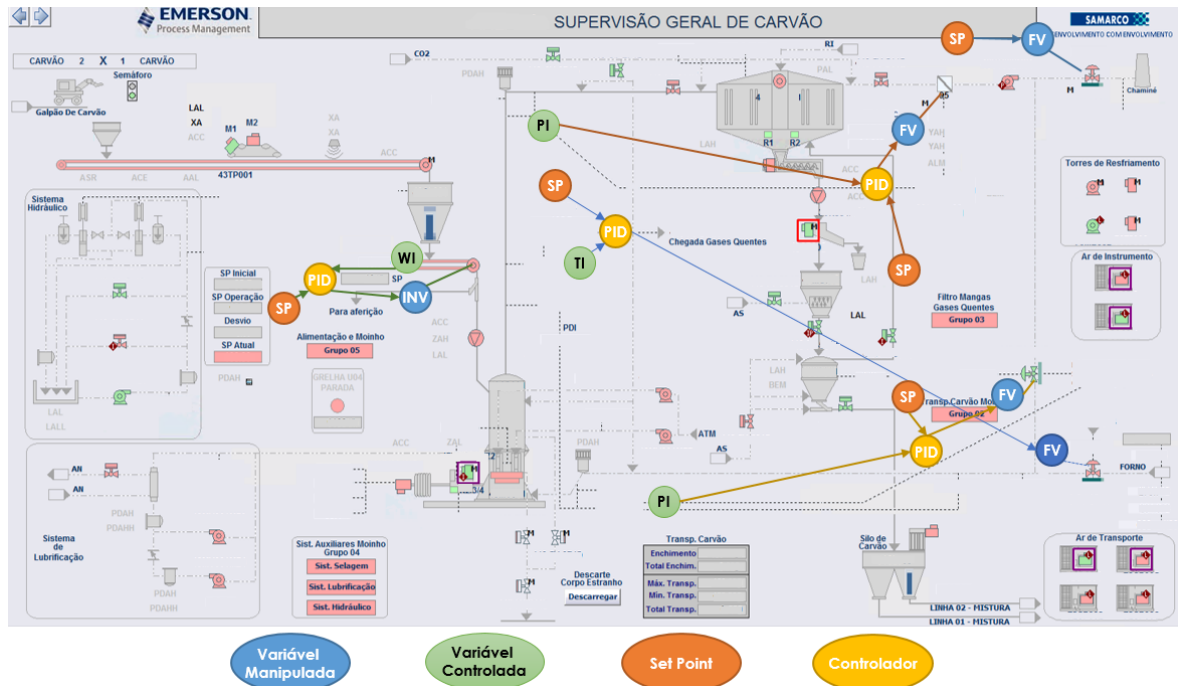
Fonte: Do Autor.

O controle do processo de moagem de carvão era realizado de forma convencional por meio de 4 malhas de controle regulatório, ou seja, sem lógica de otimização, conforme ilustrado na Figura 4. A dependência do fornecimento de gás quente proveniente do forno gerava desafios significativos, especialmente durante a troca de carro de grelha. Nesses momentos, ocorria uma redução na oferta de gás quente para a planta de carvão, o que poderia impactar diretamente a temperatura no moinho de carvão e, conseqüentemente, afetar todo o processo de produção.

Para responder a essa situação, os operadores precisavam abrir a válvula de gás quente para manter a temperatura adequada no moinho. Além disso, como medida preventiva para evitar a parada da planta, os operadores tinham que reduzir a alimentação do moinho.



Figura 4 – Supervisório da Planta de Moagem de Carvão 4 e seus controles.



Fonte: Do Autor.

## 2.2 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

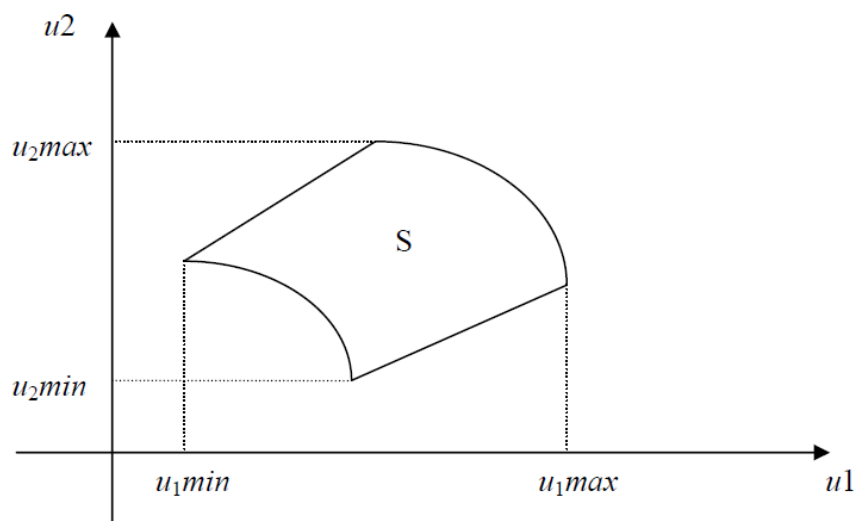
Em aplicações que demandam simplicidade na implementação, custos operacionais e de manutenção reduzidos, o controlador PID apresenta-se como uma escolha altamente adequada. Sua ampla utilização deriva de uma série de vantagens, incluindo rápida implementação, facilidade de compreensão e disponibilidade em praticamente todas as plataformas industriais de controle. Além disso, sua popularidade é atribuída ao fato de não exigir um modelo matemático específico do processo. Mesmo em situações que visam impor restrições ao controle do processo, assegurar tempos de resposta menores, minimizar atrasos e aumentar a estabilidade. A ampla adoção e utilização desse método na indústria motivou estudos contínuos em busca de aprimoramentos em seu desempenho (CASTRO; BRAGA, 2018).

O controle clássico pode ser abordado de duas maneiras distintas: tempo contínuo ou discreto. Ambas as abordagens compartilham características comuns, como a utilização de um sistema "single input single output (SISO)", um modelo de tempo contínuo ou discreto e o algoritmo clássico PID como base. No entanto, essas abordagens

enfrentam desafios não resolvidos, como a aplicação em sistemas "*multiple input multiple output (MIMO)*", a consideração de restrições nas entradas do processo e a otimização de objetivos econômicos.

Restrições nas entradas do processo podem surgir devido a várias limitações, como abertura máxima de válvulas, carga térmica de equipamentos e temperaturas admissíveis. A Figura 5 ilustra uma região viável para um controlador com duas variáveis manipuladas,  $u_1$  e  $u_2$ , sujeitas a restrições. Tratar este problema como uma otimização linear revela que o ótimo está localizado nas extremidades da região viável (S). Um controlador PID convencional, que normalmente manipula apenas uma variável, enfrentaria dificuldades ao operar nesse ponto, pois perderia sua única variável de manipulação.

Figura 5 – Janela Operacional de duas variáveis manipuladas.



Fonte: (PEREZ, 2006).

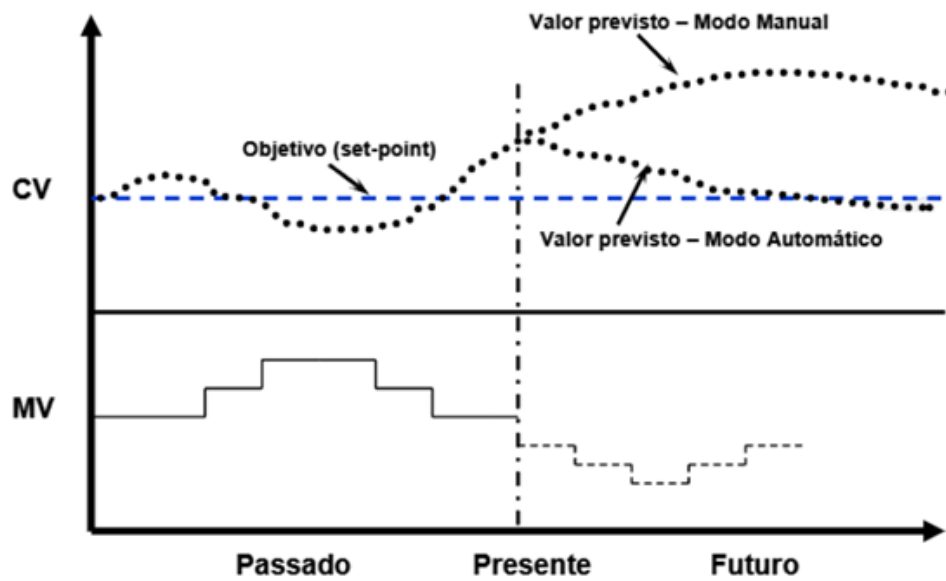
Em sistemas que exigem robustez a perturbações, menor variação de parâmetros ou envolvem processos multivariáveis, o MPC destaca-se em comparação ao PID. Geralmente, o MPC oferece uma gama mais ampla de recursos do que o PID, embora nem sempre todos esses recursos sejam necessários. Recomenda-se a aplicação do MPC como a escolha preferencial para o controle em processos que apresentem acoplamento entre variáveis, objetivos de otimização competitivos e restrições de processo limitadas (TEIXEIRA *et al.*, 2010).

O conceito de controle preditivo abrange uma variedade extensa de técnicas de controle que empregam um modelo do processo para antecipar sua saída em momentos futuros e derivar o sinal de controle visando minimizar uma função de custo (CAMACHO, 2013).

De acordo com (EUZÉBIO *et al.*, 2010), em 1976, Martin-Sanchez obteve a primeira patente que utiliza o controle preditivo, utilizando um modelo interno para realizar um controle adaptativo. Esse método foi denominado Controle Preditivo Adaptativo. Desde então, diversas pesquisas têm sido conduzidas com o intuito de aplicar o MPC na indústria.

A eficácia do MPC se destaca em situações desafiadoras de controle, como processos com dinâmicas complexas (tempo-morto, interações, não-lineares), sistemas multivariados, compensação antecipatória de perturbações medidas (*feed-forward*), controle por restrição (*override*) e otimização econômica do processo. O algoritmo MPC possui uma natureza preditiva, utilizando um modelo interno do processo para antecipar o comportamento futuro das variáveis dependentes (CV - controladas ou restrições) ao longo de um horizonte temporal futuro, com base em variações nas variáveis manipuladas (MV) ou perturbações (DV). Esse modelo é derivado de testes de variação realizados na própria unidade de processo. Ao empregar as previsões futuras das variáveis dependentes, o algoritmo calcula os ajustes necessários nas variáveis manipuladas, minimizando a soma dos erros futuros. Esses erros representam as discrepâncias entre os valores previstos para essas variáveis e a trajetória desejada (GUIMARÃES, 2006). Uma representação gráfica desse algoritmo pode ser observada na Figura 6:

Figura 6 – Ações do Controle Preditivo.



Fonte: (GUIMARÃES, 2006).

O desenvolvimento de uma aplicação de controle MPC segue um conjunto de etapas específicas, tais como: análise detalhada do processo, definição da estrutura de controle, revisão do controle regulatório, realização de testes e identificação do processo, criação, análise e validação de modelos, projeto e desenvolvimento do controlador, sintonia e simulação de testes, comissionamento e pré-operação, seguidos por monitoramento contínuo e manutenção. A fase de identificação do processo requer testes de campo para a geração de modelos, sendo uma etapa que pode demandar tempo, dependendo da dinâmica do processo.

A tecnologia MPC demonstra uma relativa capacidade de adaptação às variações temporais do processo. Contudo, suas principais desvantagens residem na complexidade relativa, dificuldade de implementação e manutenção, associadas à necessidade de obtenção precisa dos modelos do processo. Algumas empresas fornecem versões integradas desse tipo de controlador na forma de blocos funcionais em seus sistemas digitais. Essas versões incluem ferramentas de engenharia projetadas para simplificar e reduzir custos e prazos de implementação. O MPC é o controlador mais adaptado para utilização em processos multivariáveis e com necessidade de limitações e restrições de parâmetros.

A Samarco utiliza o Sistema de Controle Distribuído (DCS - *Distributed Control System*) DeltaV da Emerson Process Management como visto na Figura 7 como ferramenta de controle de processos na Usina 4 em Ubu.

Figura 7 – DCS DeltaV.

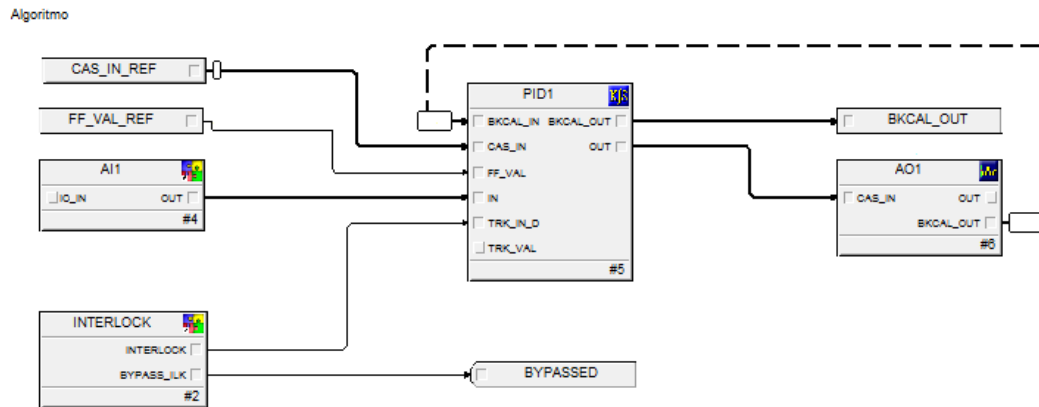


Fonte: (EMERSON, 2023).

Um DCS se diferencia de um Controlador Lógico Programável (CLP) convencional em vários aspectos. Esse tipo de sistema é composto por um conjunto integrado de hardware e software. Diversos controladores podem ser distribuídos pela planta, todos conectados à mesma rede de comunicação e compartilhando os mesmos dados de processo. Além disso, um DCS possui alta capacidade de processamento e ferramentas avançadas de software para otimização da produção.

A programação no sistema DeltaV é realizada utilizando blocos de função. Na Figura 8, apresenta-se o algoritmo de um dos controladores PID utilizados no processo de moagem de carvão. Os parâmetros de entrada, saída e sintonia são configurados no bloco principal.

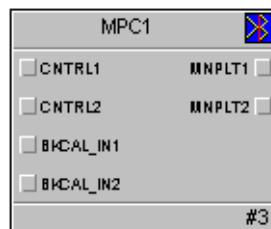
Figura 8 – Algoritmo de um controlador PID no ambiente DeltaV.



Fonte: Do Autor.

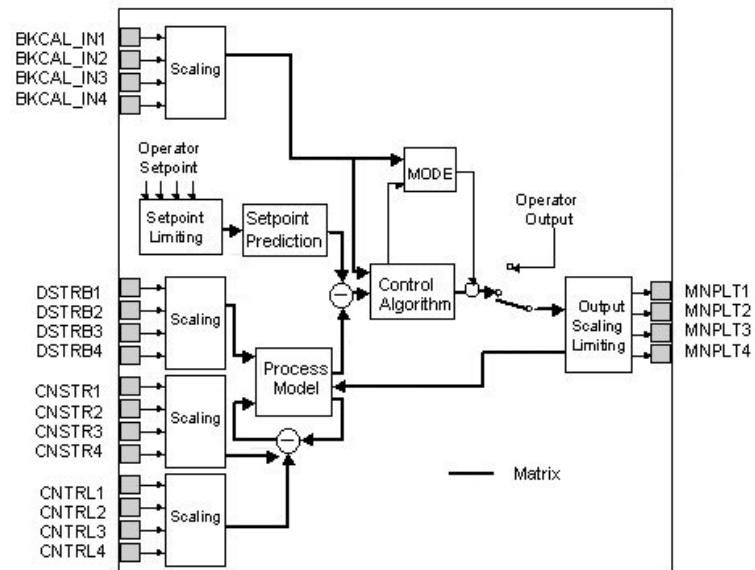
A ferramenta de desenvolvimento de lógicas de controle de processo do DeltaV é conhecida por Control Studio. Essa plataforma de programação permite a criação das lógicas em linguagem de blocos de funções. O próprio sistema disponibiliza o bloco de função MPC (Figuras 9 e 10) e o bloco MPC Pro (Figuras 11 e 12) que permitem que processos interativos sejam controlados dentro de restrições operacionais mensuráveis, ao mesmo tempo em que leva em conta a interação do processo e distúrbios mensuráveis. Esse bloco é a base para a implementação do controle multivariável em um sistema DeltaV e pode ser utilizado para substituir o controle PID padrão que utiliza feedforward, redes de desacoplamento e override para controle multivariável.

Figura 9 – Bloco MPC no sistema DeltaV.



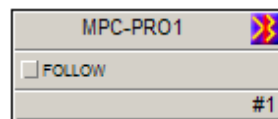
Fonte: (EMERSON, 2023).

Figura 10 – Esquema do bloco MPC no sistema DeltaV.



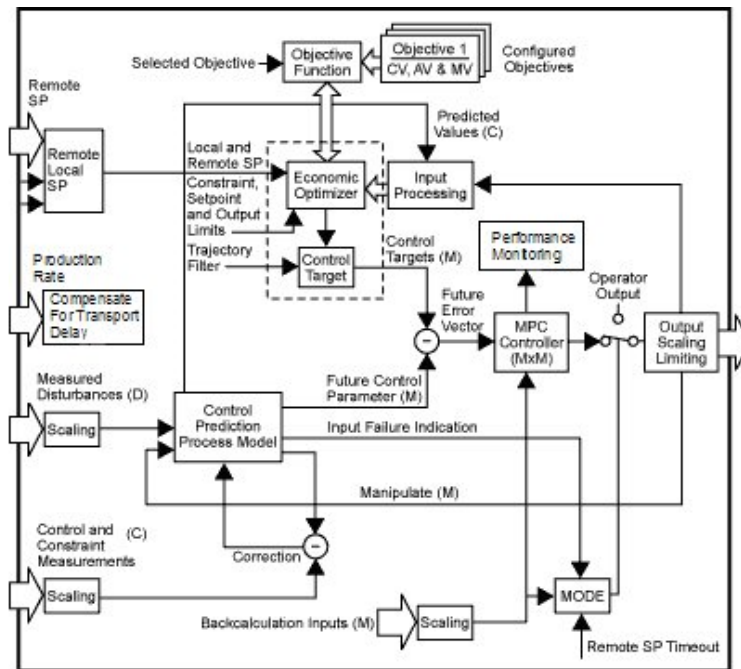
Fonte: (EMERSON, 2023).

Figura 11 – Bloco MPC Pro no sistema DeltaV.



Fonte: (EMERSON, 2023).

Figura 12 – Esquema do bloco MPC Pro no sistema DeltaV.



Fonte: (EMERSON, 2023).

Os blocos MPC e MPC Pro possuem diferenças em suas características:

Bloco MPC:

- Implementação simplificada de um MPC;
- Não possui camada de otimização;
- Limitado a no máximo 4 variáveis controladas, 4 variáveis de restrições, 4 variáveis manipuladas e 4 variáveis de perturbações.

Bloco MPC Pro:

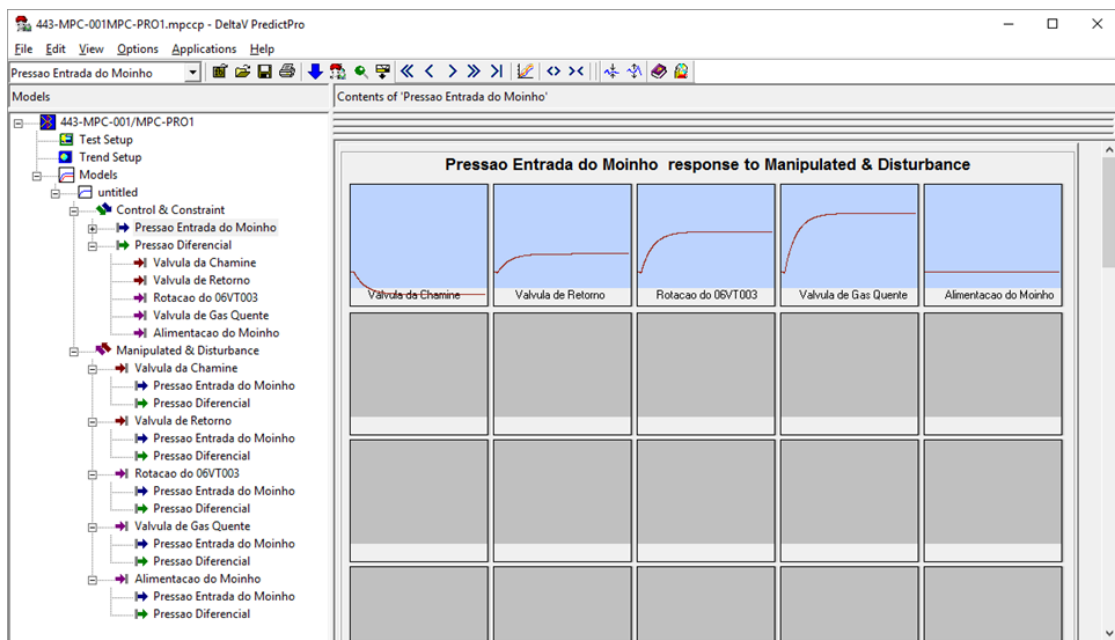
- Implementação de um grande número de entradas e saídas (20x20);
- O bloco pode ser executado em um controlador (PCU) ou em uma estação de trabalho (Workstation);



- Possui camada de Otimização para cálculo dos valores de referência ótimos obedecendo a limites e restrições.

O usuário define todos os parâmetros (manipulados, distúrbios, restrições e controlados) no bloco de funções MPC para o processo desejado usando o Control Studio. O usuário pode iniciar o aplicativo DeltaV Predict no Control Studio. A aplicação DeltaV Predict (Figura 13) é usada para comissionar o bloco de função MPC. Quando um módulo que contém o bloco MPC é baixado, todas as entradas e saídas são atribuídas ao Historiador Contínuo.

Figura 13 – Aplicação DeltaV PredictPro



Fonte: Do Autor.

O DeltaV Predict será a ferramenta principal para o comissionamento do MPC. Este software faz parte da suíte de programas do pacote DeltaV e ele permitirá a realização de testes automatizados, ajustes finos do sistema e a verificação da resposta do MPC em diferentes cenários operacionais.

### 3 METODOLOGIA

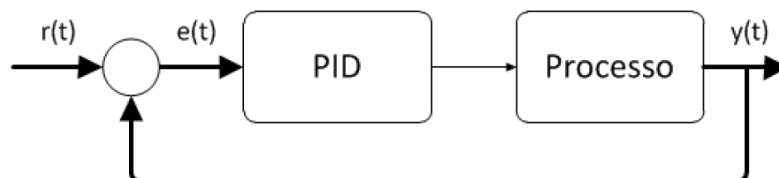
Neste capítulo, abordam-se todos os aspectos do desenvolvimento da aplicação do MPC industrial no sistema DeltaV, que é o sistema de controle distribuído (DCS, distributed control system) da usina de pelotização da Samarco.

A lógica de controle PID fundamenta-se no cálculo do erro  $e(t)$  entre o valor desejado  $r(t)$  e o retorno da planta  $y(t)$ , ou seja,  $e(t) = r(t) - y(t)$ , conforme ilustrado na Figura 14. Sua equação de controle é descrita em 3.1:

$$C = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.1)$$

em que  $k_p$ ,  $k_i$  e  $k_d$  são os parâmetros de sintonia que representam os ganhos proporcional, integral e derivativo do PID, respectivamente. A seleção ótima dos ganhos é realizada utilizando métodos de sintonia disponíveis na literatura, como o Método de Ziegler e Nichols, o Método de Cohen-Coon e o Método do Modelo Interno (IMC). Uma compilação dos métodos de sintonia PID pode ser encontrada em (O'DWYER, 2009).

Figura 14 – Sistema de Controle PID.



Fonte: (O'DWYER, 2009).

#### 3.1 MALHAS DE CONTROLE DA PLANTA

As malhas de controle que compõem o sistema de controle da planta de moagem de carvão da usina 4 de pelotização são:

- Controle de dosagem de carvão bruto, em que a variável de processo é a vazão de carvão bruto e a variável manipulada é a velocidade da correia de alimentação do moinho;

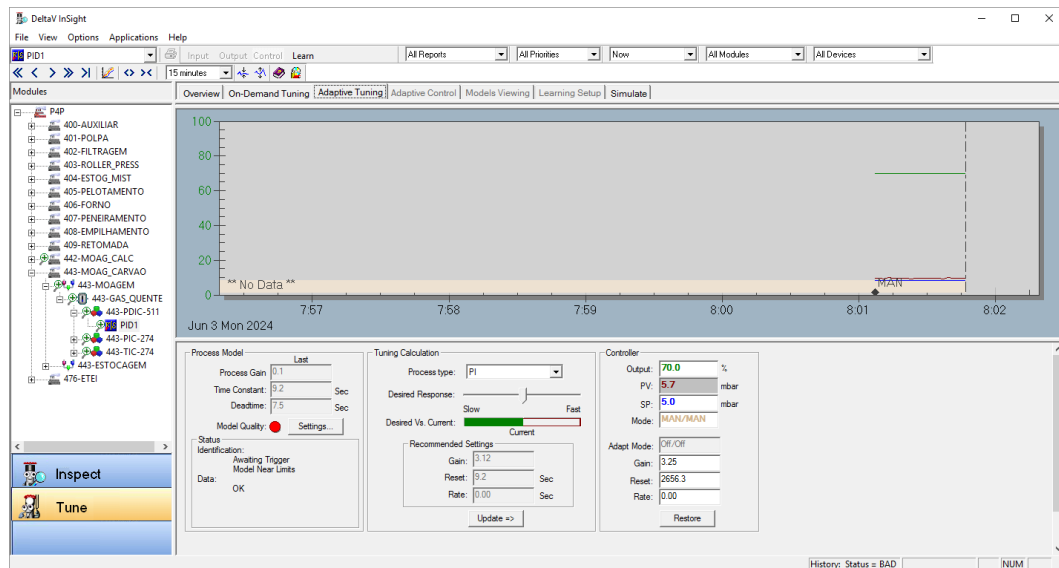
- Controle de pressão do gás quente de retorno, em que a variável de processo é a pressão do gás quente de retorno e a variável manipulada é a abertura da válvula de retorno de gás quente;
- Controle de temperatura do gás quente de retorno, em que a variável de processo é a temperatura do gás quente de retorno e a variável manipulada é a abertura da válvula de entrada de gás quente;
- Controle de pressão diferencial do filtro de mangas, em que a variável de processo é a pressão diferencial do filtro de mangas e a variável manipulada é a abertura da válvula de saída do filtro de mangas.

Para obter uma vazão estável na alimentação do moinho, é crucial que as malhas de controle citadas no Quadro 1 possam regular a pressão e temperatura, e não apenas a velocidade da correia de alimentação.

Para controlar a planta, atua-se na válvula de gás quente (que controla a temperatura na saída do moinho), válvula de retorno (que controla a pressão da entrada do moinho) e na alimentação. O operador determina a alimentação do moinho analisando a pressão diferencial que indica para ele a quantidade de material dentro do moinho. A alimentação tem que ser controlada de tal forma a não colocar mais material, dentro do moinho, do que ele pode suportar, caso exceda o limite impedirá o fluxo de gases no leito, gerando queda brusca da temperatura na saída do moinho, que está correlacionada ao aumento da pressão diferencial e vibração do mesmo, e causará a parada da planta.

Antes de realizar a sintonia dos controladores PID, é necessário identificar o comportamento do processo. O sistema DeltaV, por meio da ferramenta DeltaV Insight (Figura 15), a variável manipulada é alterada em forma de degrau para obter a curva de reação do processo.

Figura 15 – Aplicação DeltaV Insight - Tune



Fonte: Do Autor.

Após a manipulação do processo, o sistema DeltaV calcula os modelos que melhor representam a relação entre as entradas e saídas da planta.

### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO MPC

O desenvolvimento do projeto MPC pode ser dividido em três etapas principais. Primeiramente, ocorre a identificação do processo para determinar o modelo de convolução, conforme o comportamento das variáveis controladas em resposta a um degrau aplicado na planta. Em seguida, desenvolve-se o controlador, definindo seus parâmetros de sintonia. Finalmente, são realizados testes para avaliar o desempenho do controlador.

Para implementar a aplicação de controle MPC no sistema DeltaV, é necessário primeiramente definir as variáveis controladas e manipuladas que serão integradas ao controlador. Para responder à primeira questão desta pesquisa, com o objetivo de controlar a variabilidade de alimentação do moinho, as variáveis controladas definidas são:

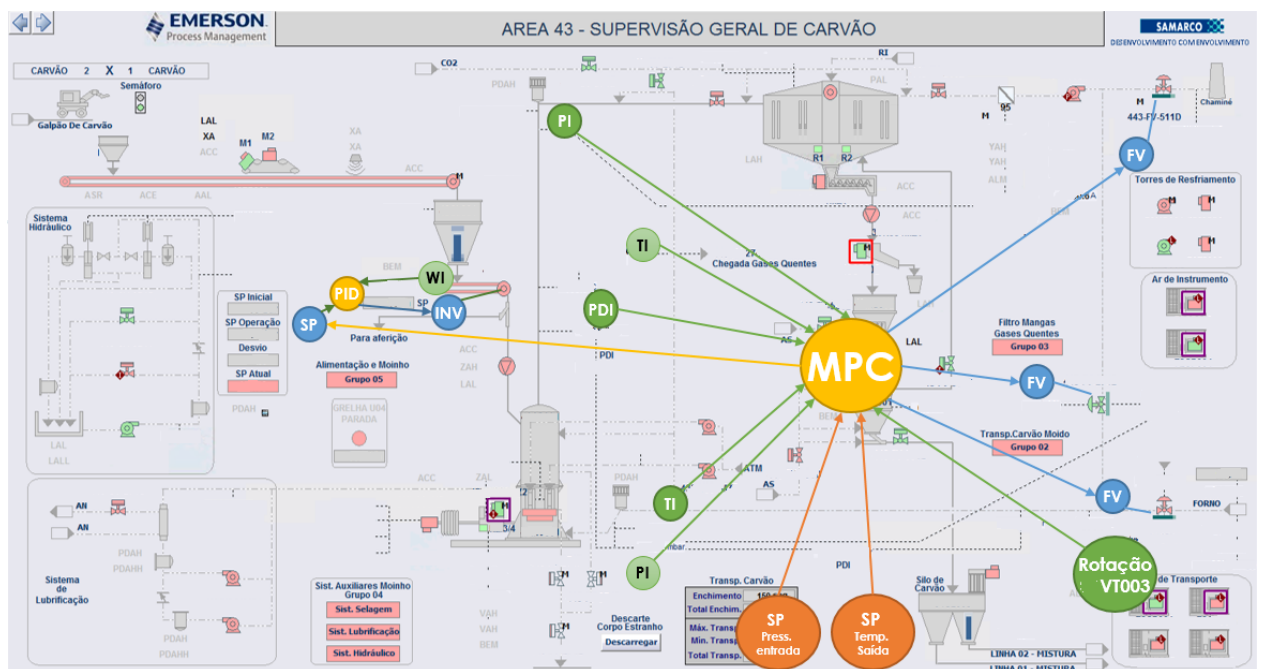
- Pressão de Entrada do Moinho;
- Temperatura de Saída do Moinho;

As variáveis manipuladas definidas são:

- SP de abertura da Válvula da Chaminé;
- SP de abertura da Válvula de Retorno de gás quente;
- SP de temperatura da malha de gás quente;
- SP de alimentação do moinho.

Uma vez que as variáveis foram definidas, é possível elaborar um diagrama esquemático do controlador MPC aplicado ao circuito de moagem, como apresentado na Figura 16. Esse diagrama é utilizado como referência para a elaboração do algoritmo de controle MPC.

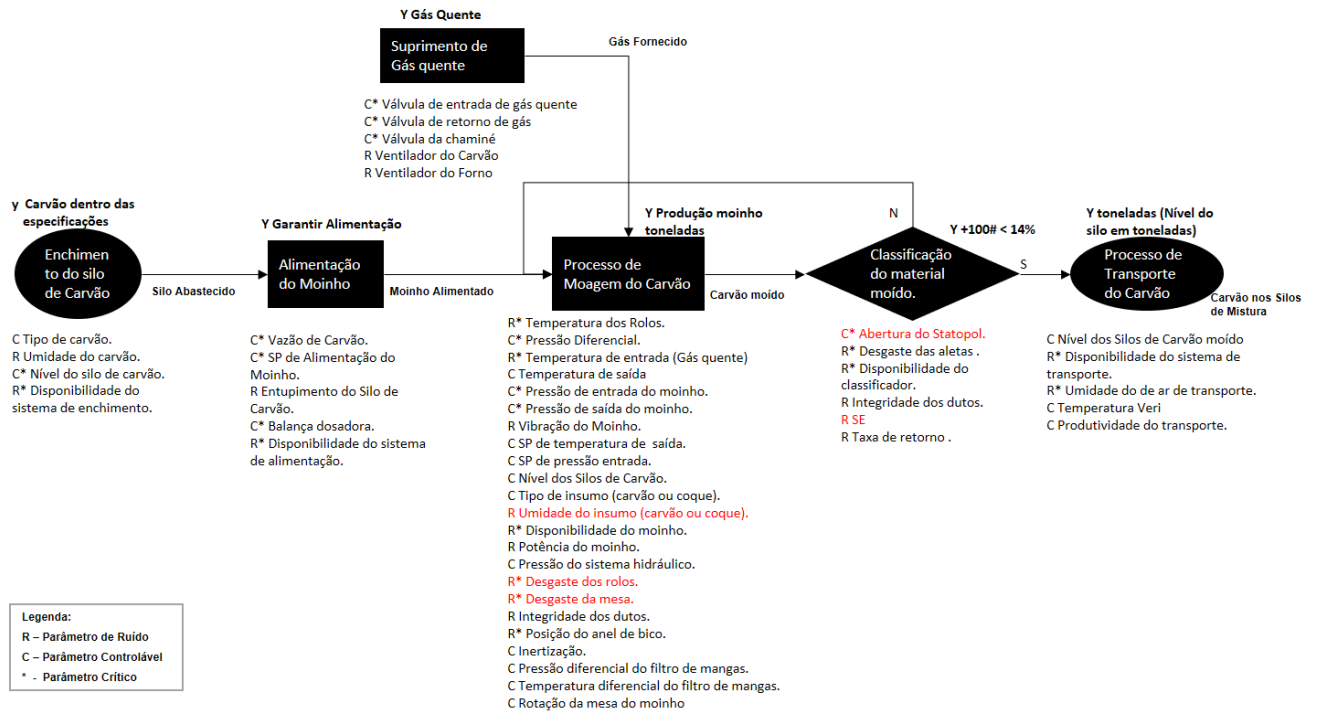
Figura 16 – MPC aplicado a planta de moagem de carvão



Fonte: Do Autor.

Um mapa do processo com as variáveis críticas, controláveis e ruídos está definido na Figura 17.

Figura 17 – Mapa do Processo de Moagem de Carvão



Fonte: Do Autor.

A identificação do processo é a etapa que realiza uma análise matemática do sistema. Isso é feito observando a resposta da planta a partir de uma excitação, com o objetivo de construir um modelo que descreva as principais características do sistema real. As principais etapas para a identificação de um sistema incluem a coleta dos dados de entrada e saída do processo, a definição do modelo matemático que representa o sistema, a estimativa dos parâmetros por meio de procedimentos numéricos para obter os coeficientes do modelo e, por fim, a validação do modelo obtido.

O objetivo era coletar dados e conhecimento necessários para desenvolver uma estratégia de controle adequada para otimizar o moinho. A primeira proposta envolveu o projeto de um controlador único, devido às fortes interações entre as entradas e saídas do processo, com estrutura apresentada abaixo:

- Controle da pressão de entrada;

Variável de Restrição: Temperatura na entrada.

Variável Manipulada: Taxa de alimentação do moinho.

Variável de Perturbação: Rotação do ventilador de exustão.

- Temperatura na saída;

Variável de Restrição: Pressão diferencial do filtro de mangas.

Variável Manipulada: abertura da válvula de gás quente.

Essa abordagem apresenta o desafio de misturar variáveis dependentes (controladas e restrições) com respostas dinâmicas muito distintas, como pressões e temperaturas. O controlador MPC disponível no SDCD, utiliza um único período de amostragem para todas as variáveis, proporcional ao tempo de estabilização da variável com a dinâmica mais lenta. Isso poderia resultar em um controle inadequado para as pressões (variáveis mais rápidas); no entanto, decidiu-se testar essa estrutura mesmo assim.

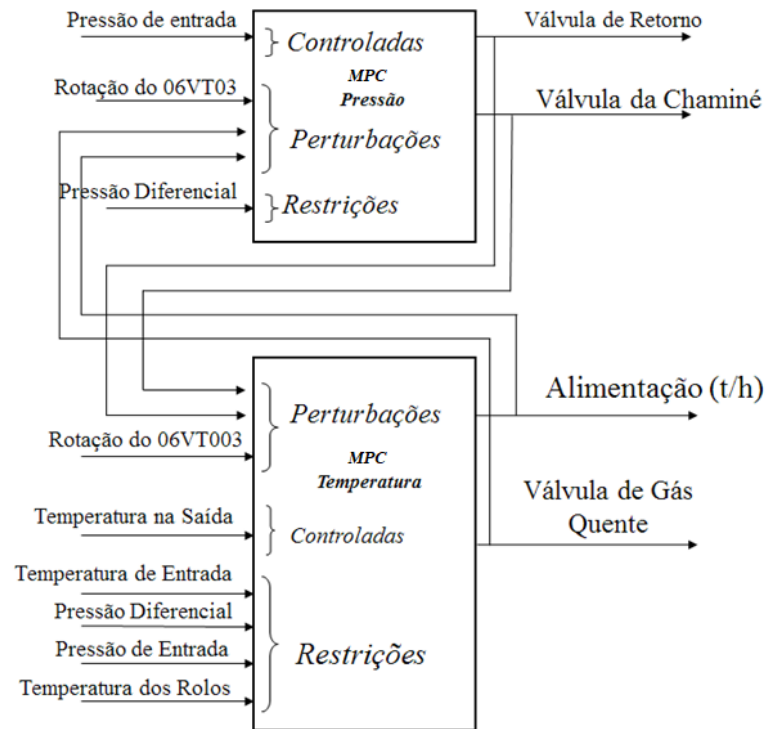
Para a quantificação dos modelos, inicialmente foi utilizada uma ferramenta de identificação automática de processos disponível no SDCD. Essa ferramenta aplica pulsos pseudo-aleatórios (PRBS) em todas as variáveis manipuladas simultaneamente. No entanto, os resultados obtidos não foram satisfatórios, apresentando baixa correlação com os dados reais e com as respostas dinâmicas conhecidas do moinho, provavelmente devido à presença de perturbações não medidas durante os testes.

Optou-se, então, pela identificação manual do efeito em cada variável de restrição ou controlada, a partir de uma variação em degrau em cada variável manipulada. Com as malhas de controle em modo manual, aguardou-se a estabilização do processo e, em seguida, aplicou-se uma variação em degrau em uma variável manipulada, repetindo-se o procedimento para todas. Ao final dos testes, os dados foram processados matematicamente e forneceram os parâmetros para modelos de primeira ordem em série com um tempo morto.

Decidiu-se, portanto, revisar a estrutura do controlador de modo a separar os módulos de controle, criando um controlador para a pressão e outro para a temperatura. Dessa forma, o tempo de amostragem de cada controlador MPC seria ajustado à dinâmica específica de cada variável relevante ao controle do moinho. O desacoplamento entre

os dois controladores é obtido utilizando as saídas de controle de um módulo como perturbações para o outro. A Figura 18 apresenta a estrutura de controle final adotada.

Figura 18 – Estrutura final dos controladores.



Fonte: Do Autor.

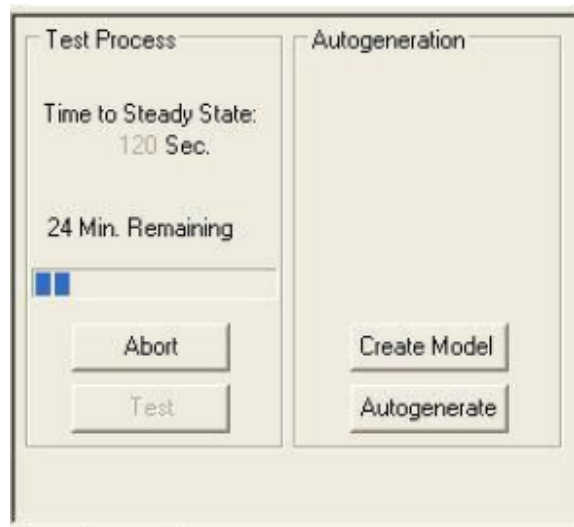
A estrutura foi dividida em dois módulos de controle e foram carregados na mesma unidade de processamento. A escolha do bloco do tipo MPC Pro se deu pelas suas características (já citadas) em relação a outra opção.

O sistema DeltaV oferece a possibilidade de realizar experimentos para modelar o processo por meio da ferramenta DeltaV Predict. Essa modelagem tem como objetivo estabelecer a relação entre as variáveis manipuladas e as variáveis controladas.

Após a definição do período histórico de dados para utilização como referência para modelagem, é preciso definir o percentual de degrau que será inserido no processo para que se analise as respostas e iniciar o procedimento de teste (Figura 19).



Figura 19 – Janela de Teste do DeltaV Predict

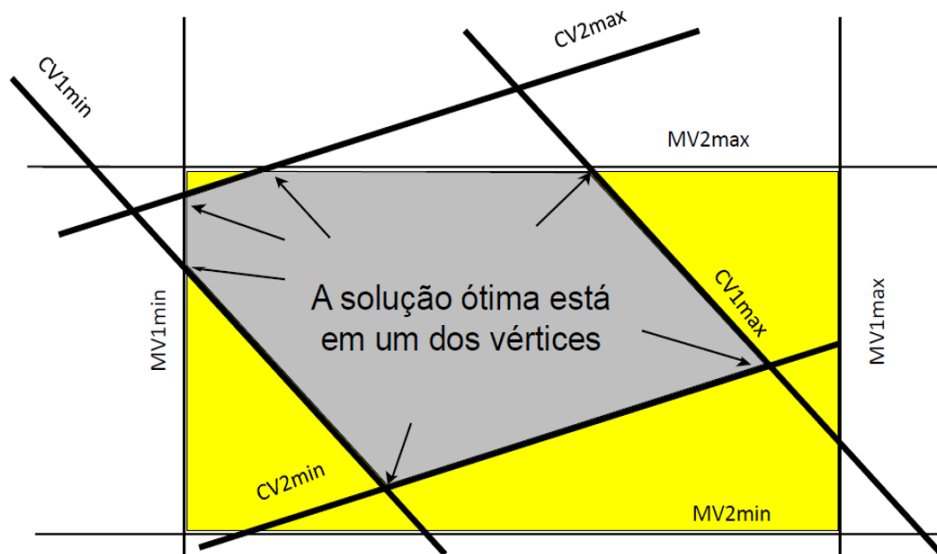


Fonte: Do Autor.

Após o procedimento de teste o DeltaV Predict exibe as respostas das variáveis e a partir deste ponto, é possível iniciar a geração do modelo clicando em "Autogenerate"(Figura 19).

O sistema calcula os valores das variáveis dependentes em estado estacionário que maximizem ou minimizem uma função econômica de lucro ou custo, respeitando os limites da planta (Figura 20). O próprio sistema usa estes valores como "set-points" para o cálculo das ações de controle. A solução ótima é encontrada em um dos vértices marcado pelas setas.

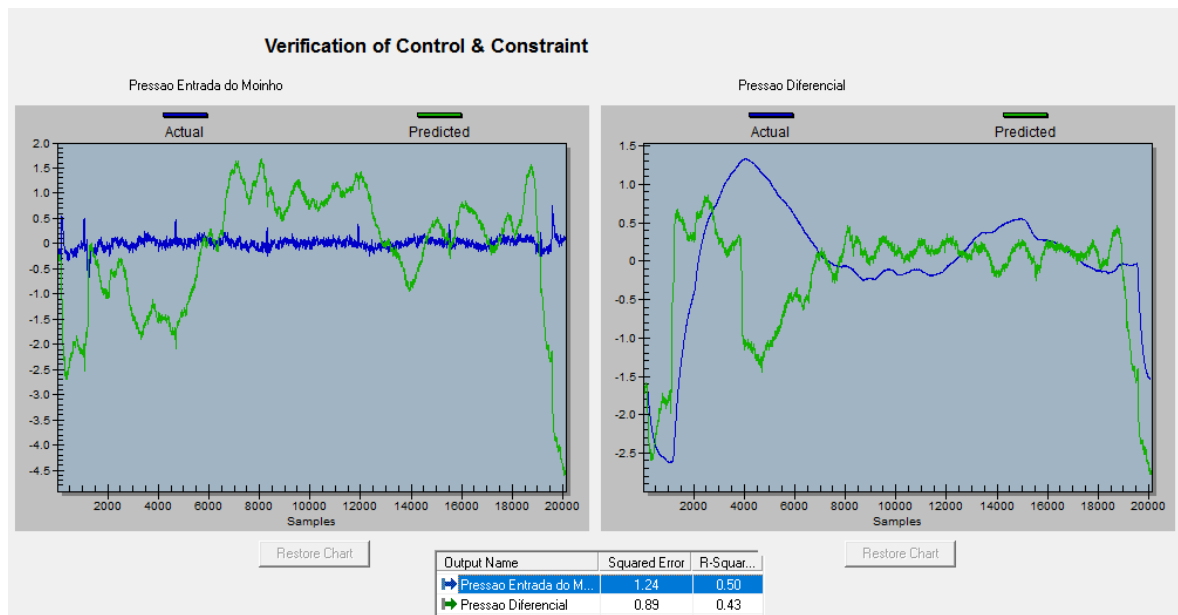
Figura 20 – Otimização por Solução Ótima



Fonte: Do Autor.

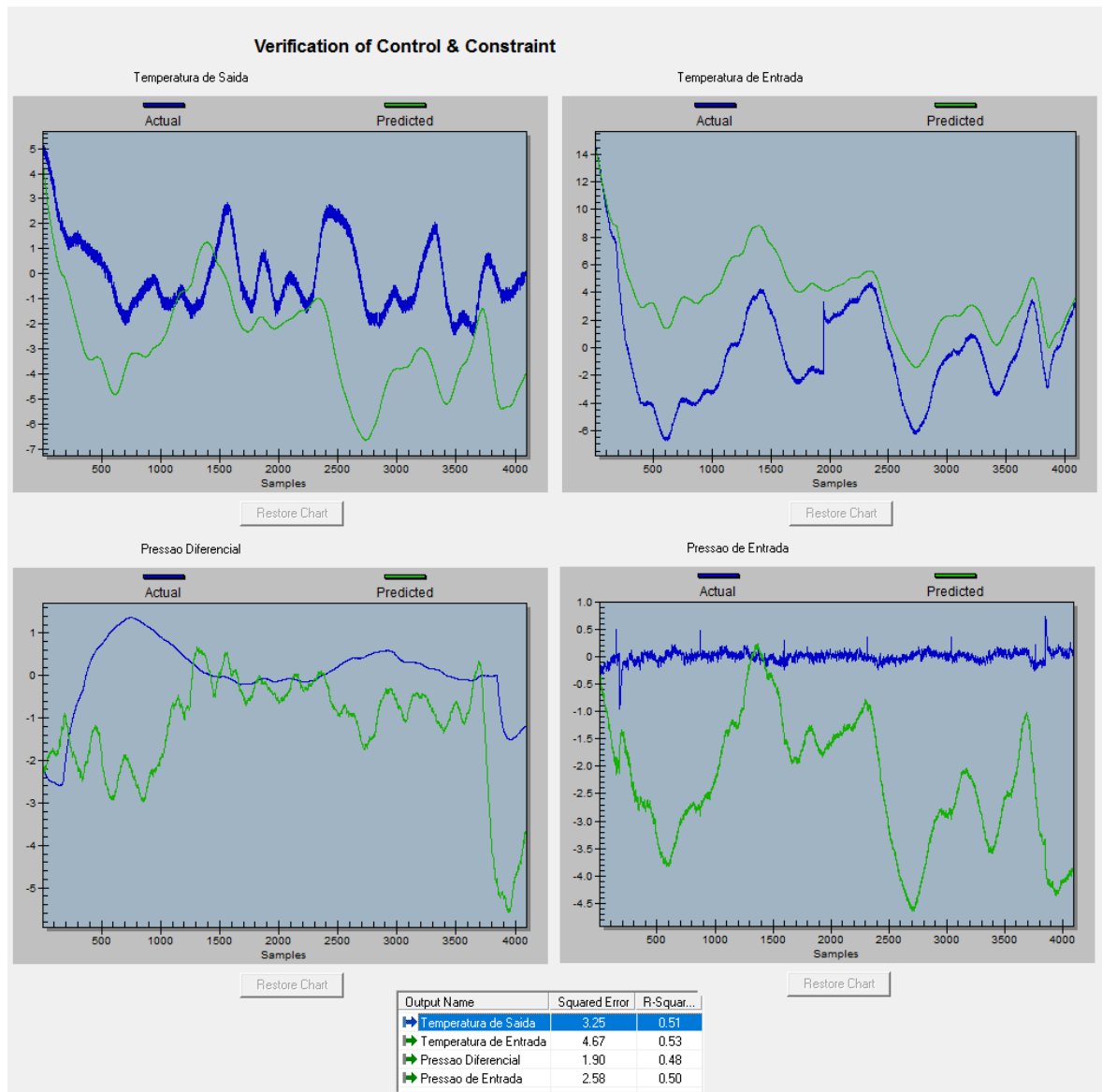
Quando o processo de geração é finalizado, o modelo pode ser verificado com seu erro quadrático e R quadrado (Figura 21 e 22).

Figura 21 – Resultado do modelo de pressão



Fonte: Do Autor.

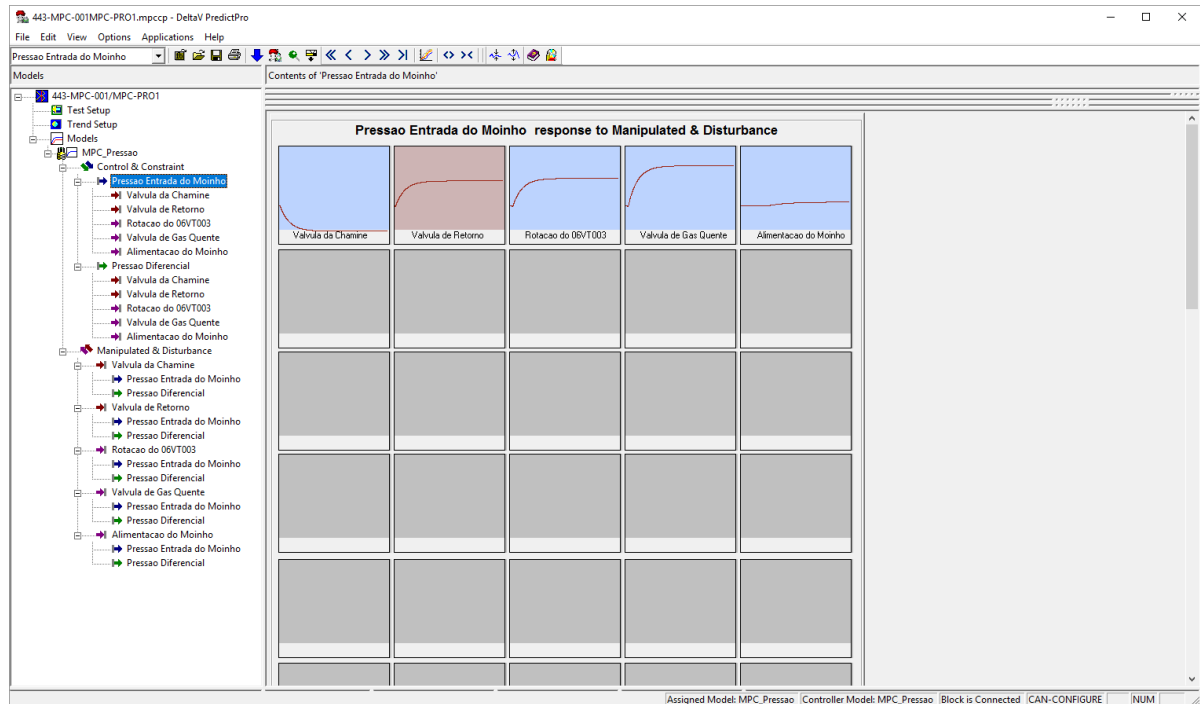
Figura 22 – Resultado do modelo de temperatura



Fonte: Do Autor.

A aplicação DeltaV Predict permite verificar a resposta de cada variável aos estímulos no processo. Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29 e Figura 30 para o MPC de controle de Pressão.

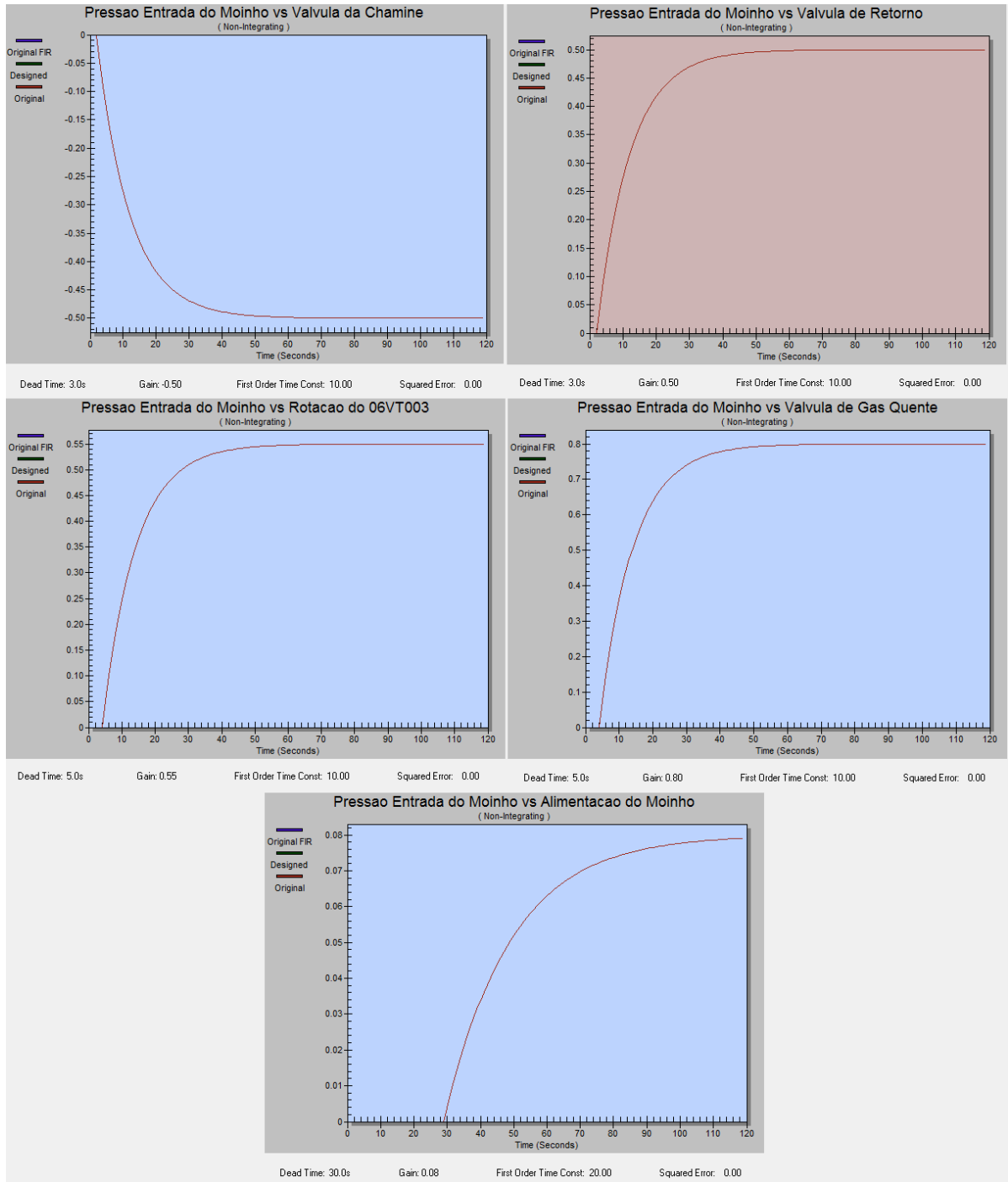
Figura 23 – Respostas das variáveis manipuladas, perturbações e restrições em relação a Pressão de Entrada do Moinho (MPC de controle de Pressão)



Fonte: Do Autor.

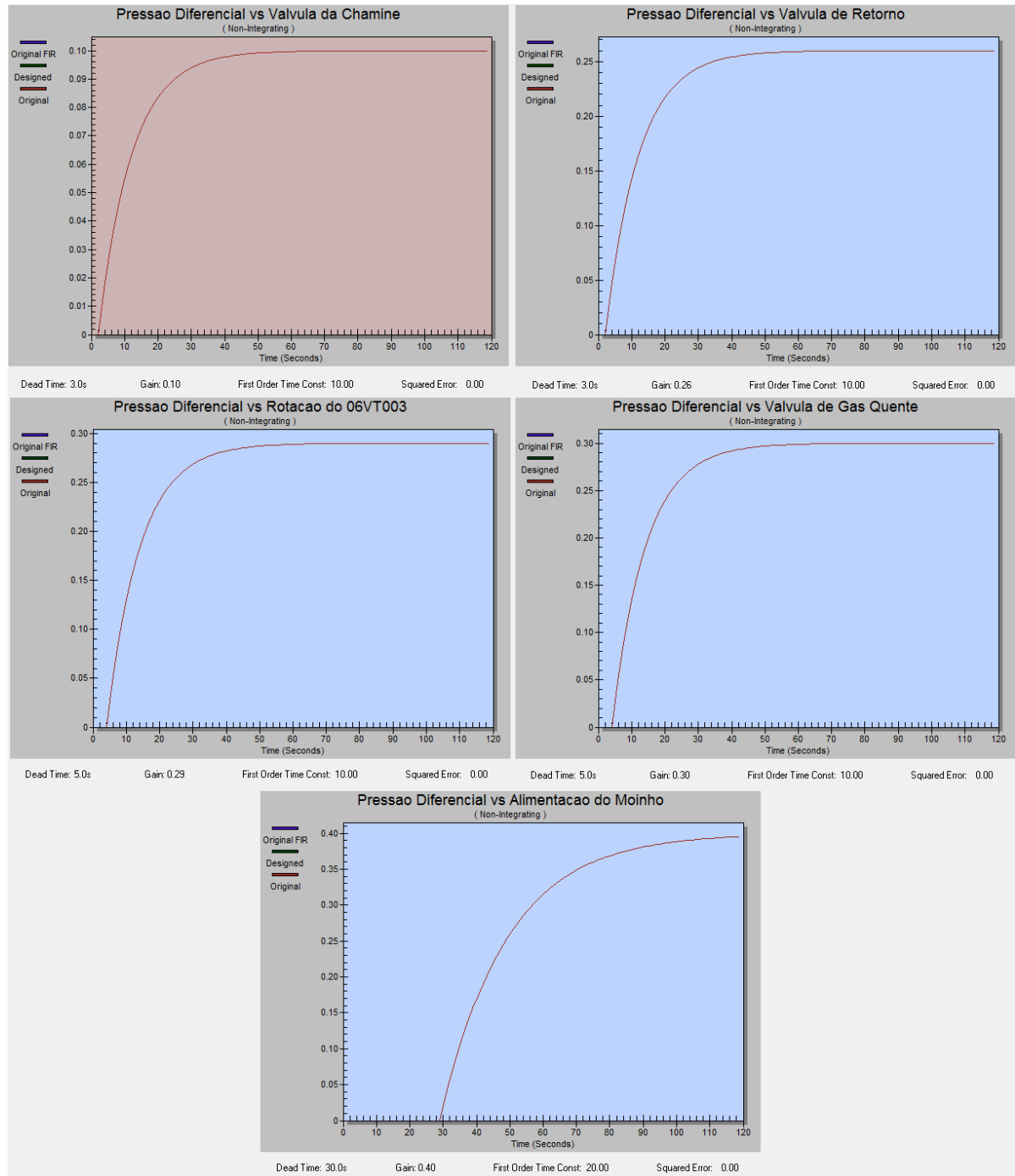
É possível analisar de forma individual cada resposta obtida pela aplicação (Figura 24):

Figura 24 – Respostas individuais das variáveis manipuladas, perturbações e restrições em relação a Pressão de Entrada do Moinho



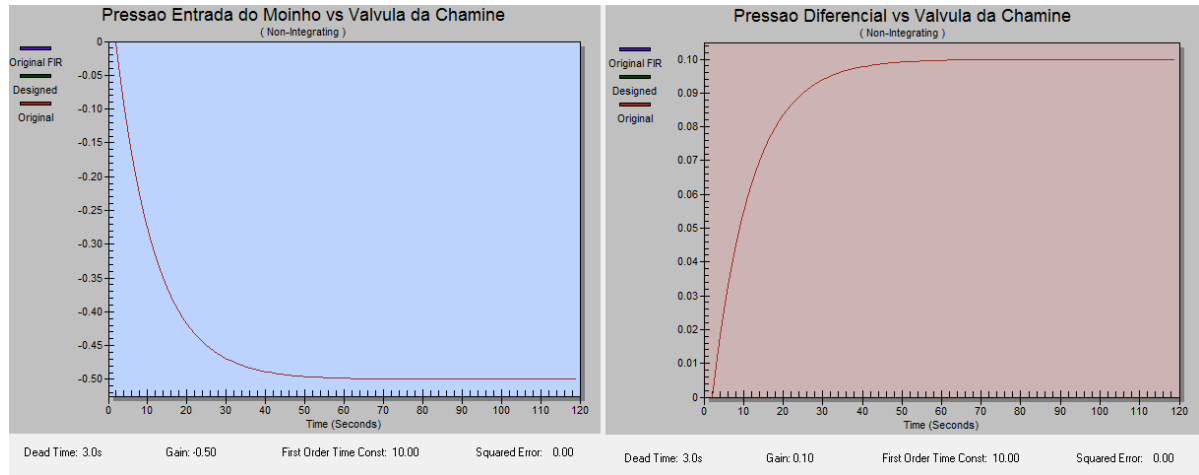
Fonte: Do Autor.

Figura 25 – Respostas individuais das variáveis manipuladas, perturbações e restrições em relação a Pressão Diferencial



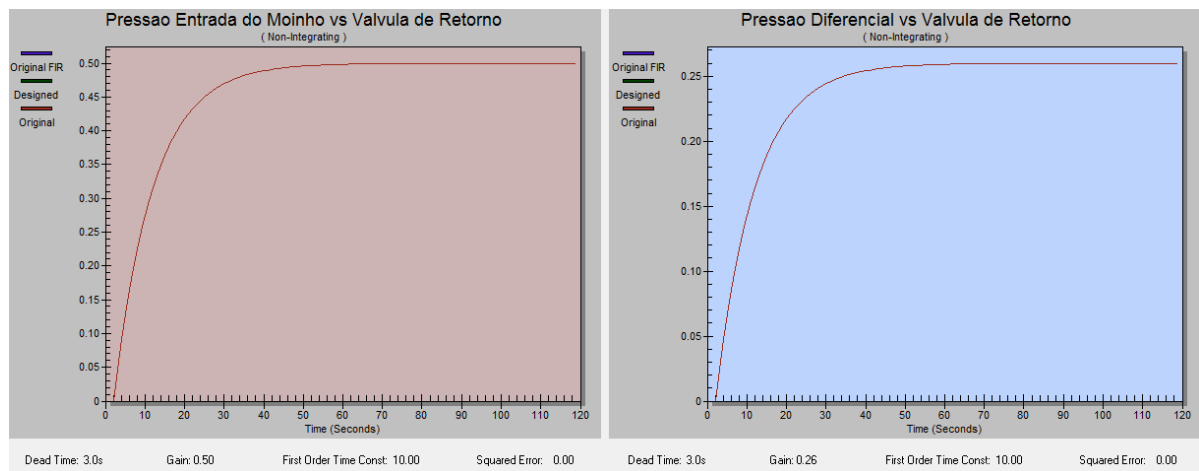
Fonte: Do Autor.

Figura 26 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Válvula da Chaminé



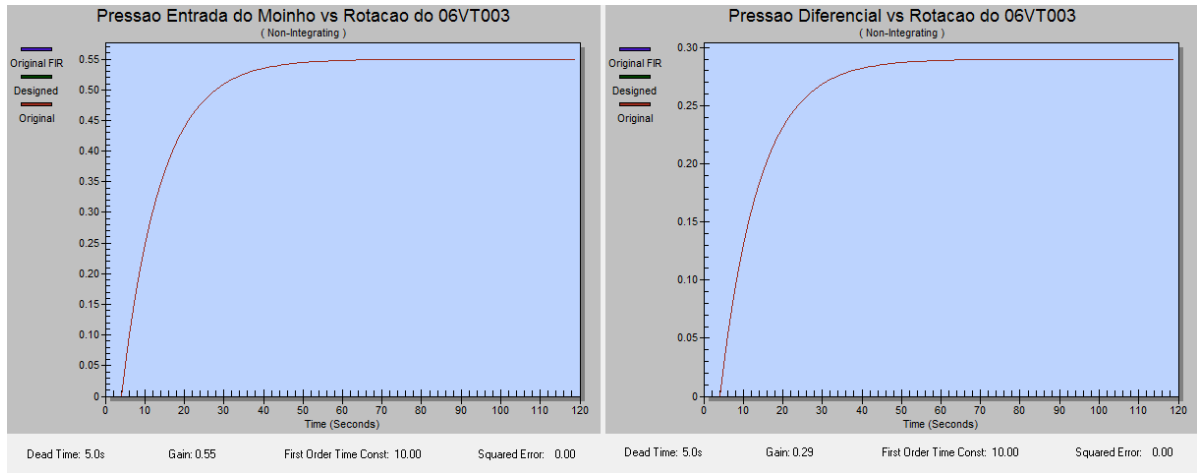
Fonte: Do Autor.

Figura 27 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Válvula de Retorno



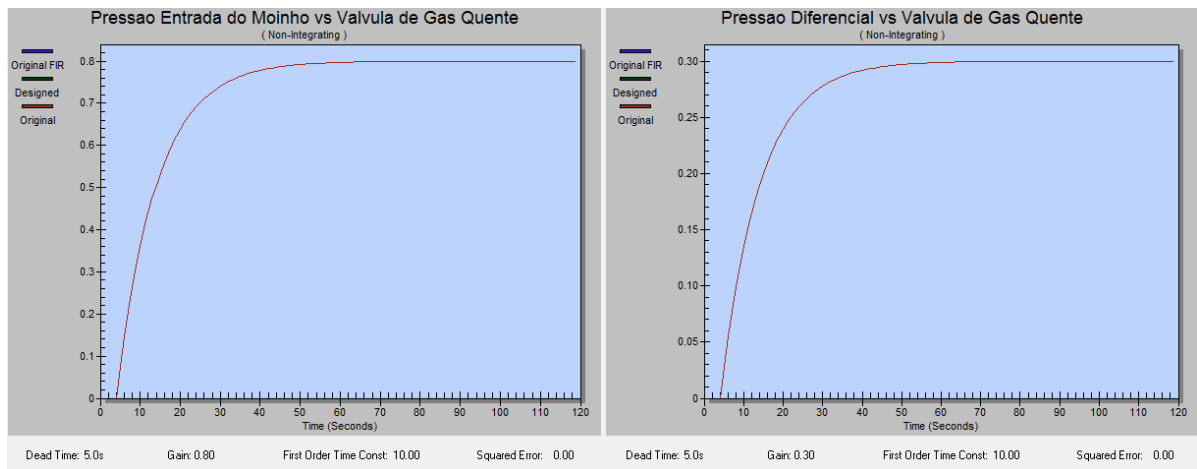
Fonte: Do Autor.

Figura 28 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Rotação do 06VT013



Fonte: Do Autor.

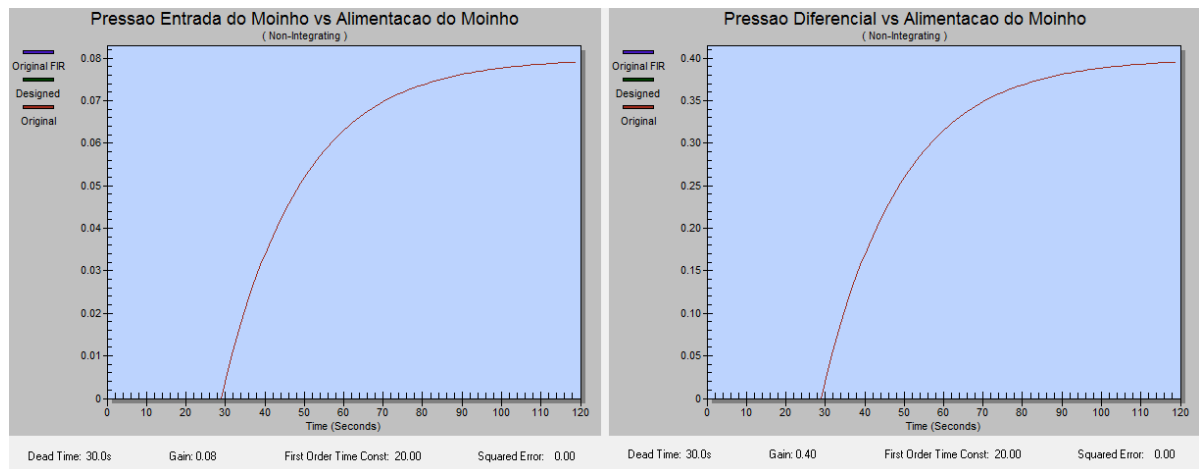
Figura 29 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Válvula de Gás Quente



Fonte: Do Autor.

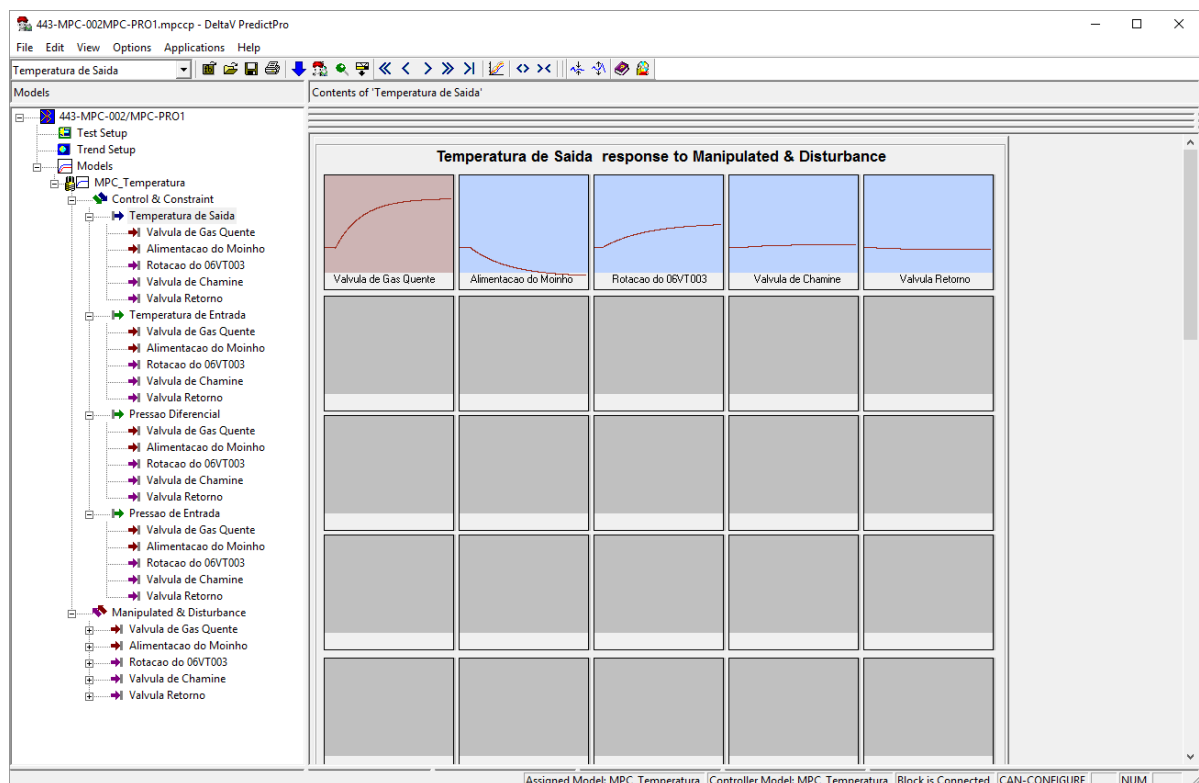


Figura 30 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Alimentação do Moinho



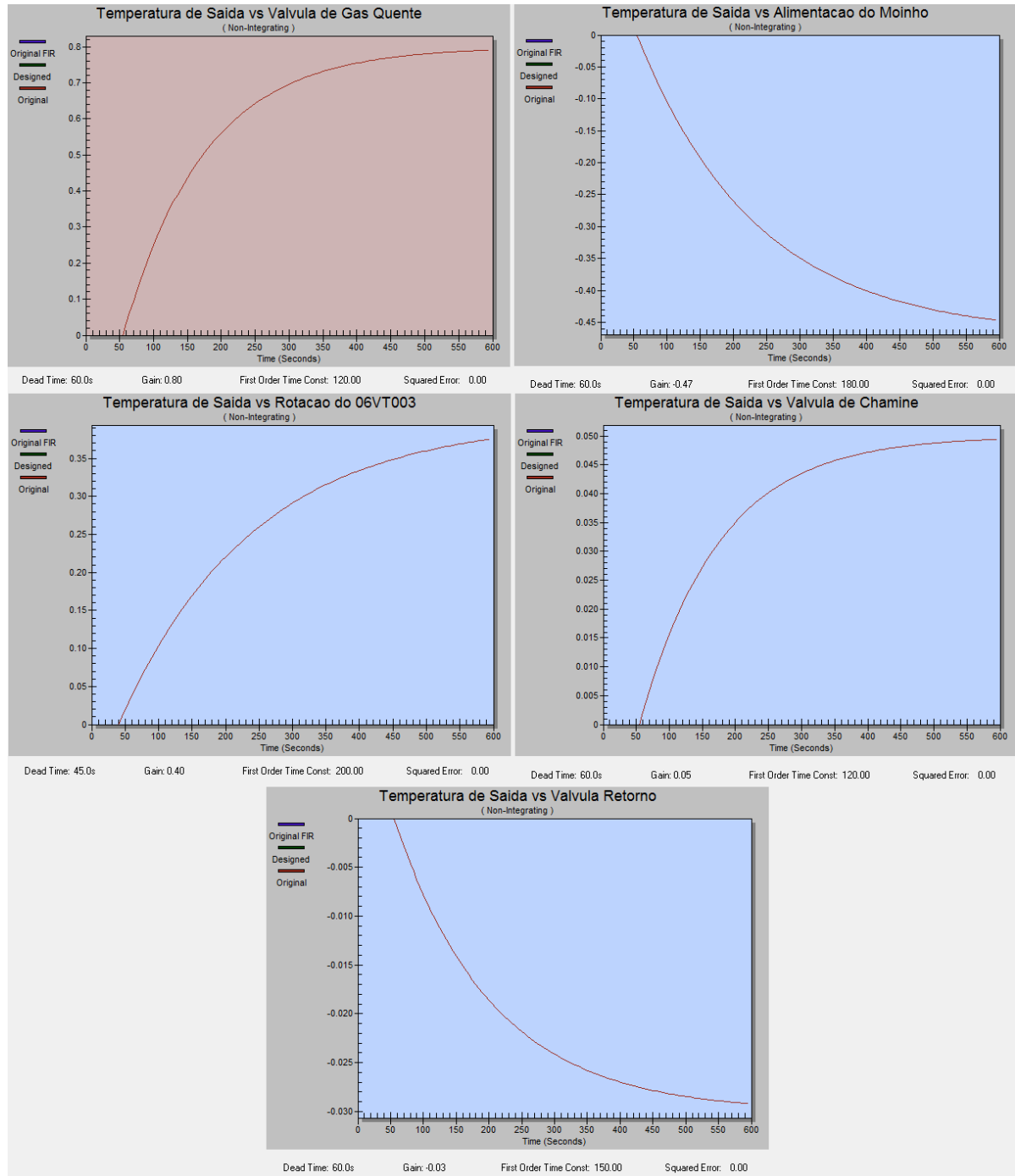
Fonte: Do Autor.

Figura 31 – Respostas das variáveis manipuladas, perturbações e restrições em relação a Temperatura de Saída do Moinho (MPC de controle de Temperatura)



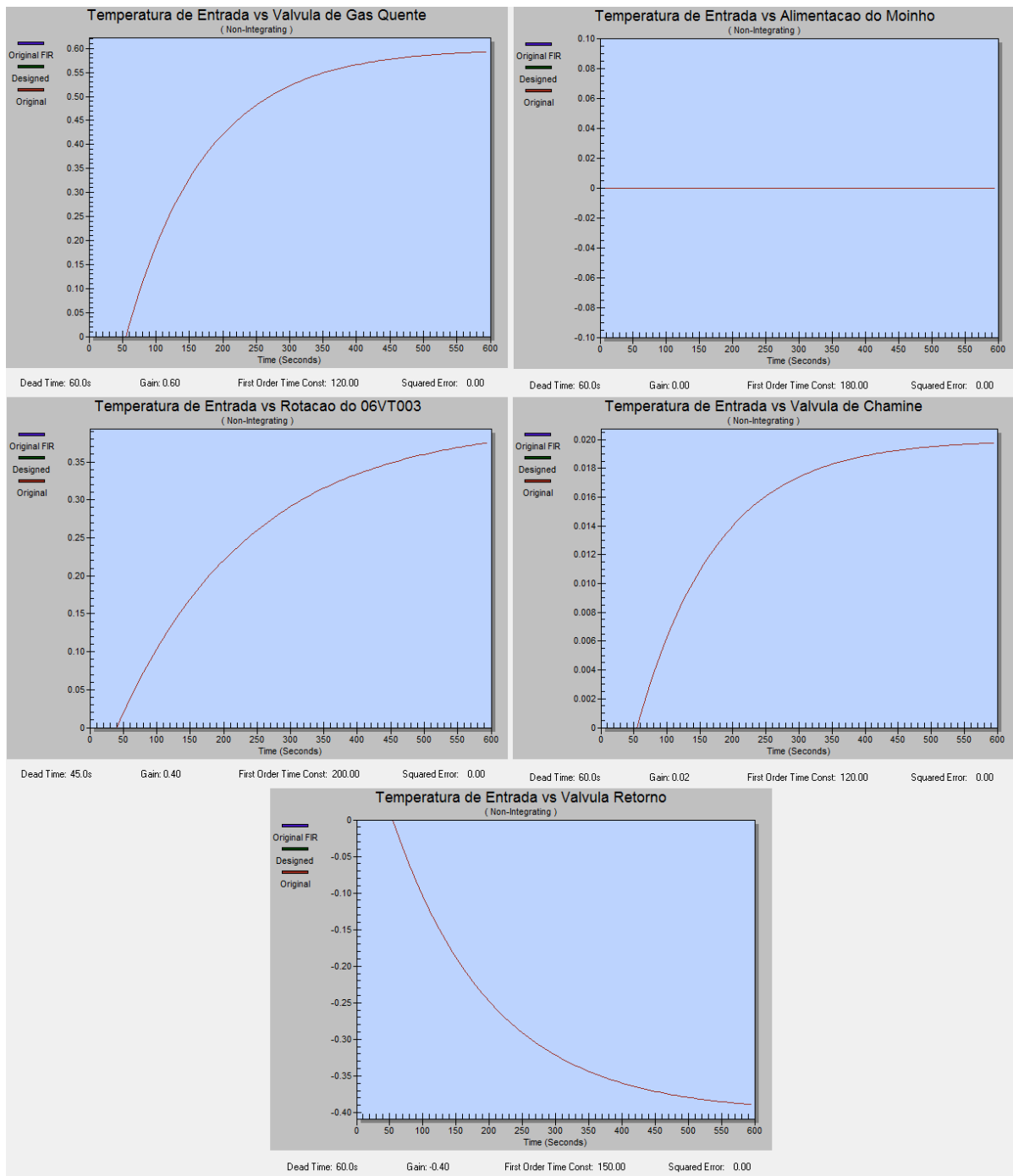
Fonte: Do Autor.

Figura 32 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Temperatura de Saída



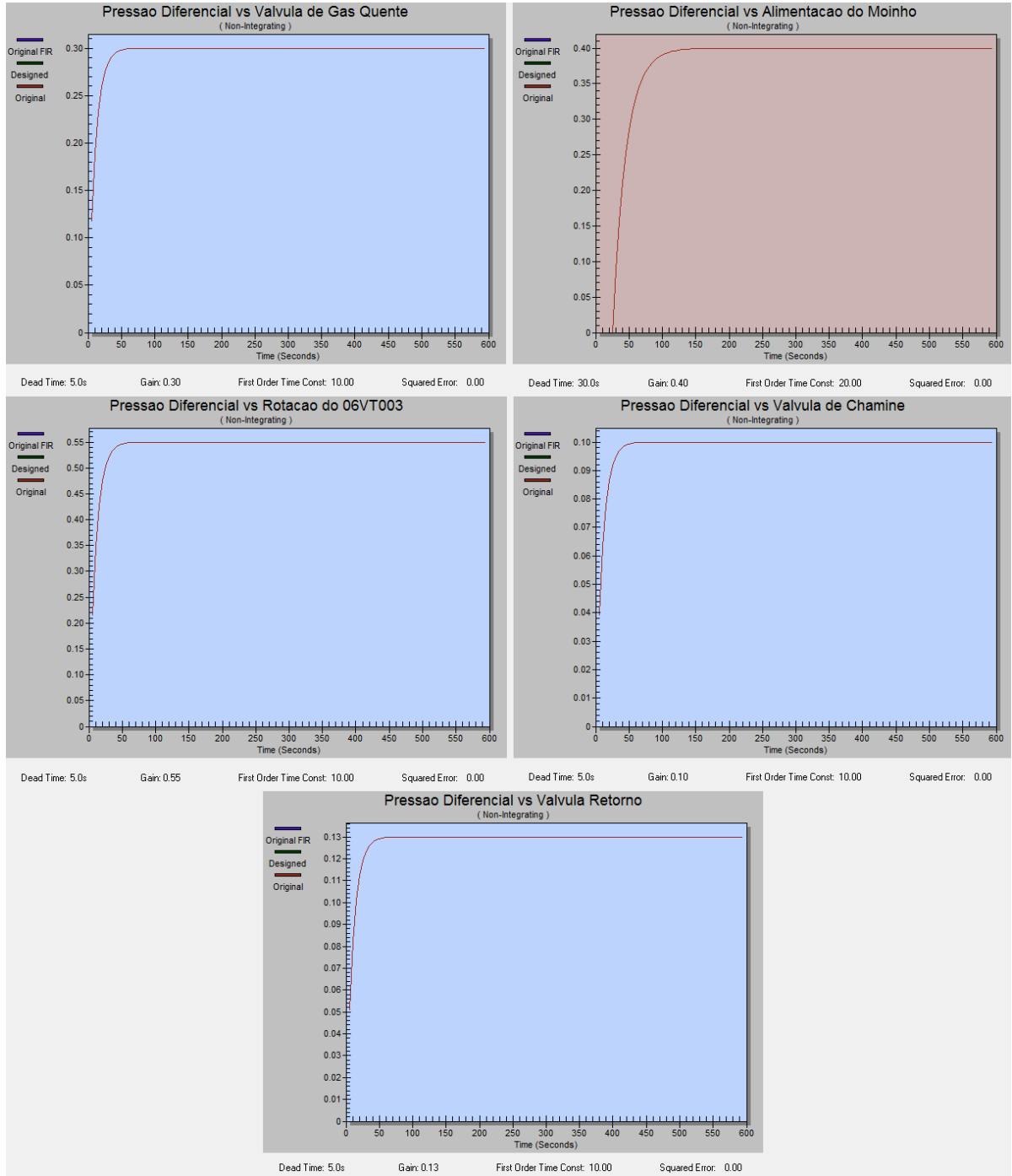
Fonte: Do Autor.

Figura 33 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Temperatura de Entrada



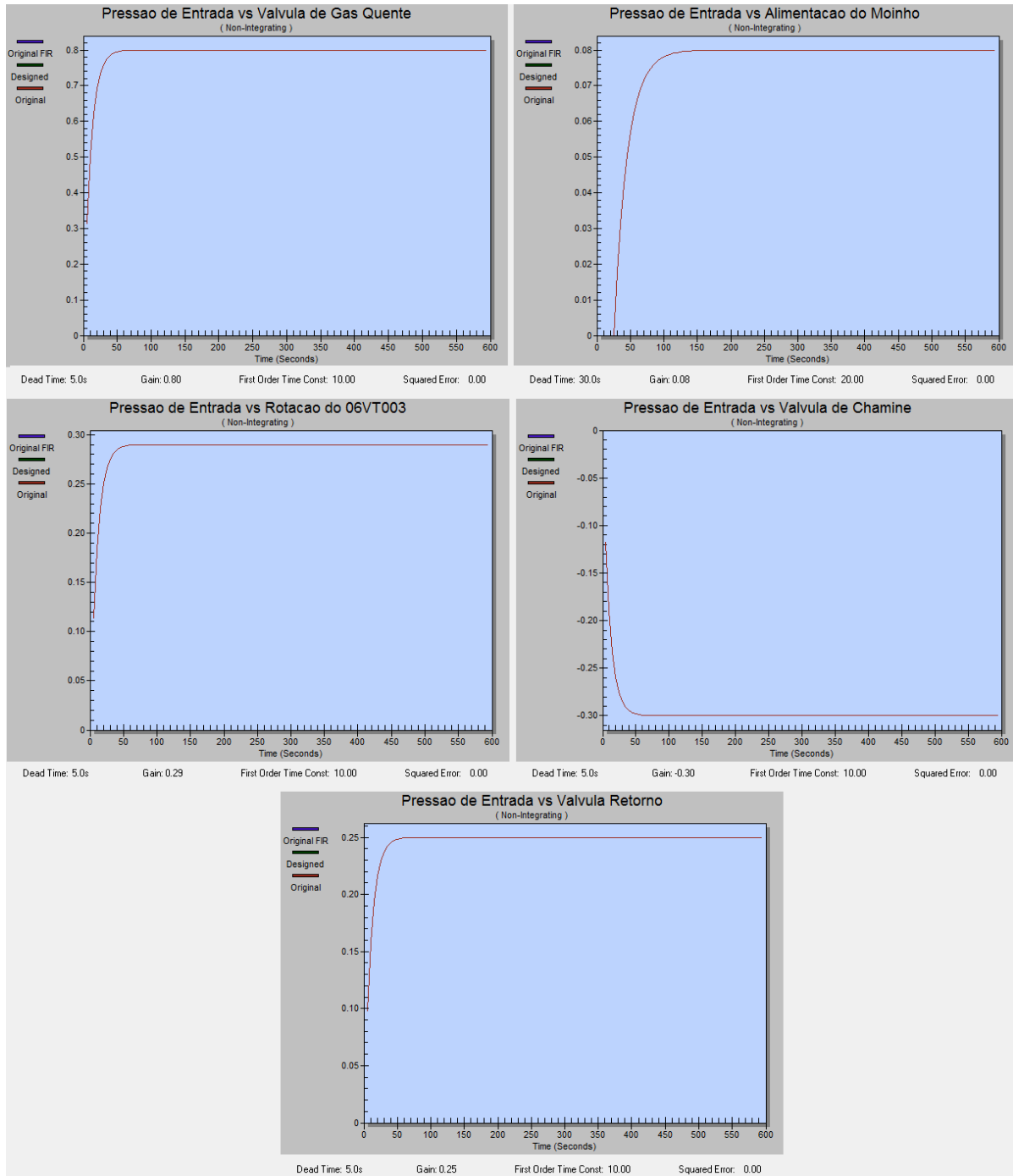
Fonte: Do Autor.

Figura 34 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Pressão Diferencial



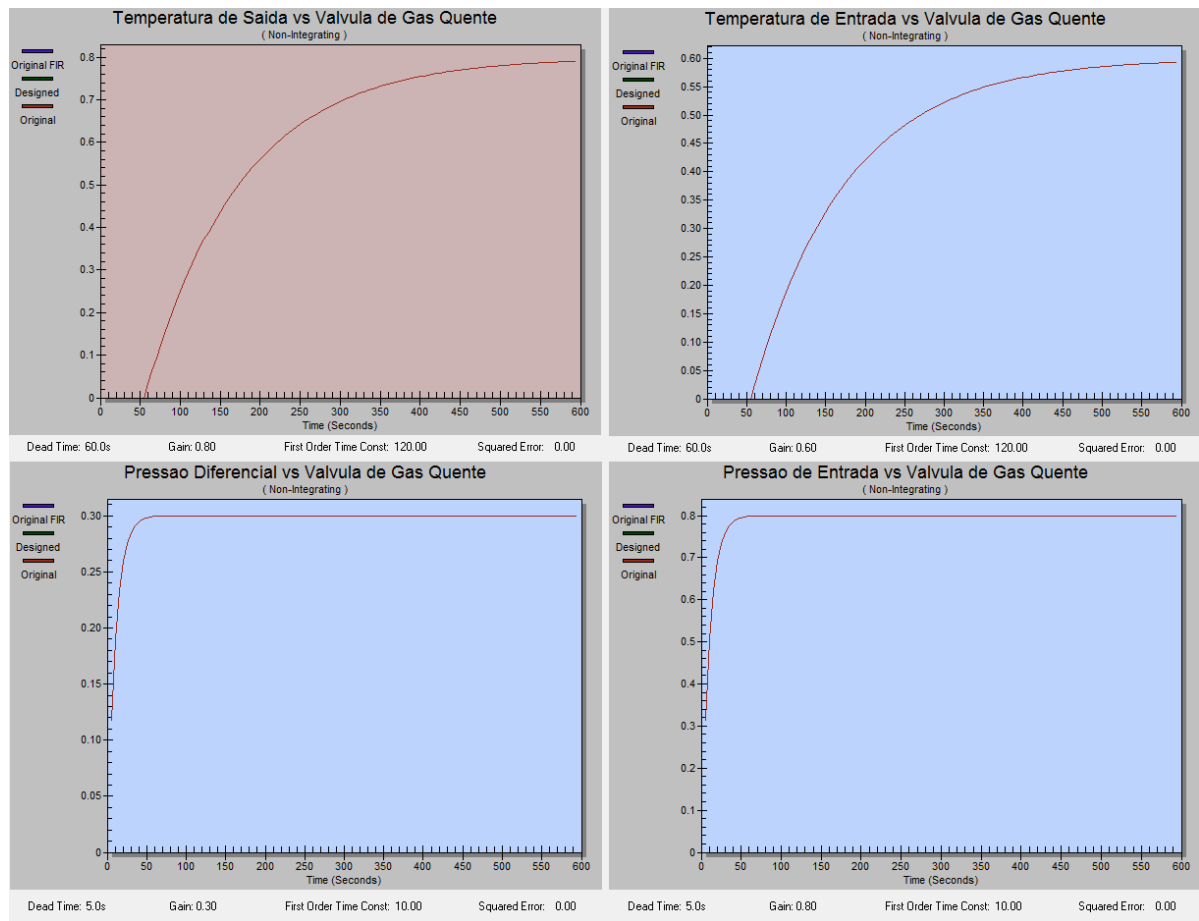
Fonte: Do Autor.

Figura 35 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Pressão de Entrada



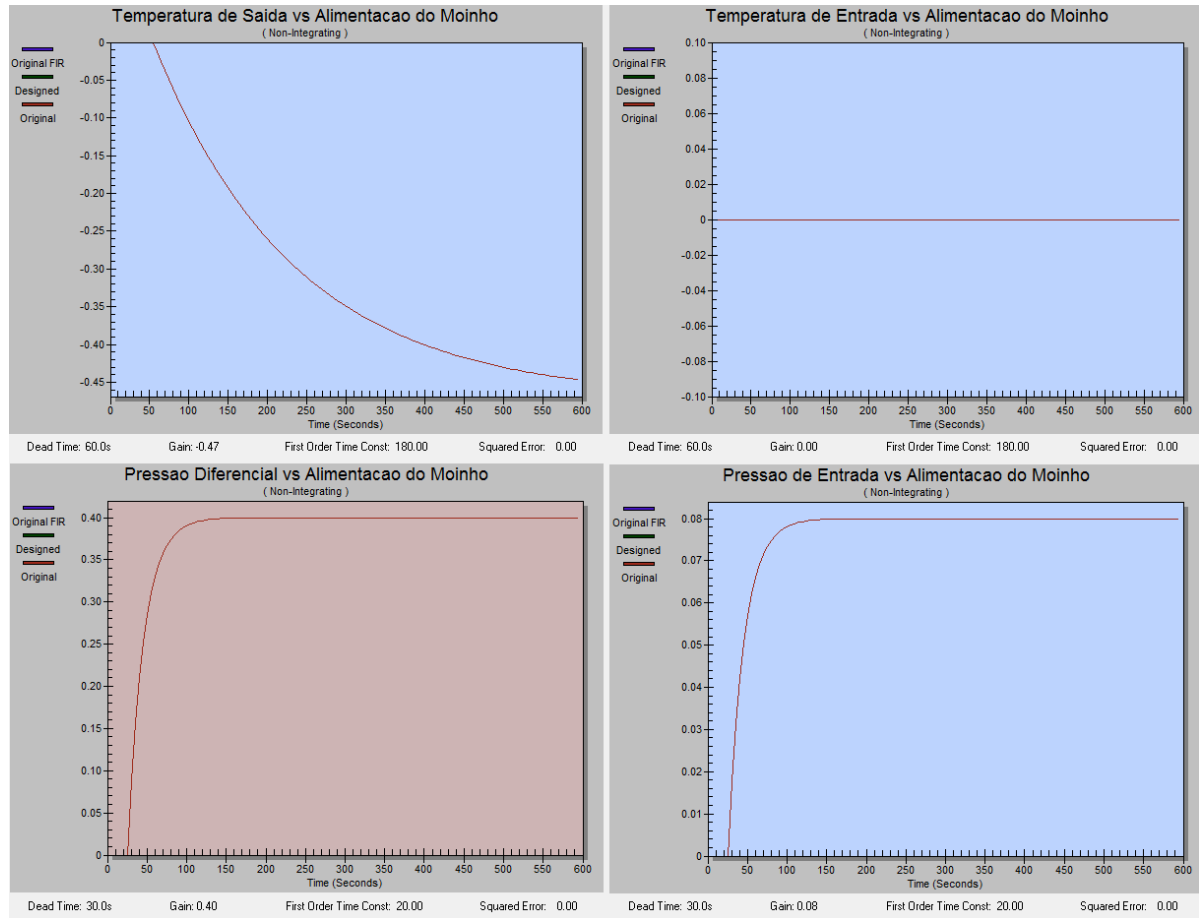
Fonte: Do Autor.

Figura 36 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Válvula de Gás Quente



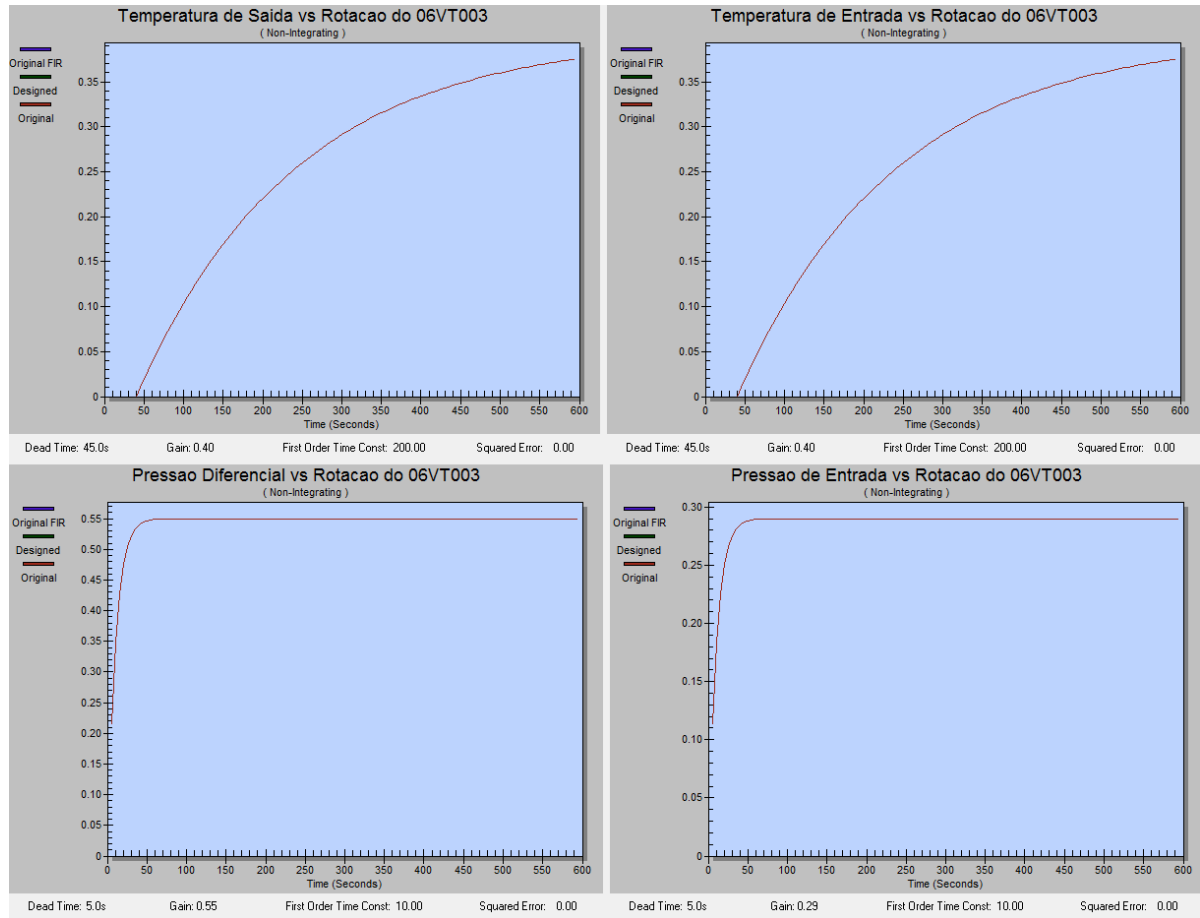
Fonte: Do Autor.

Figura 37 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Alimentação do Moinho



Fonte: Do Autor.

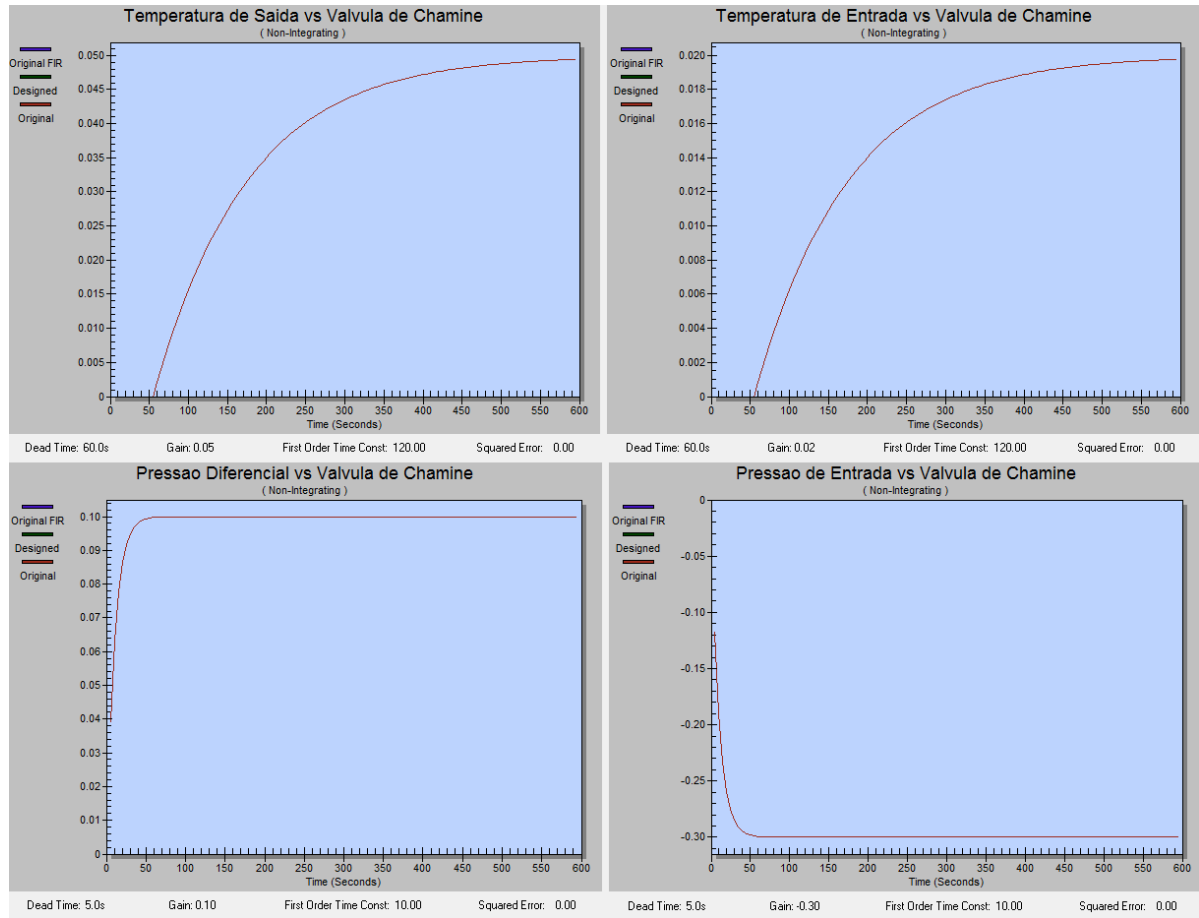
Figura 38 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Rotação do 06VT013



Fonte: Do Autor.

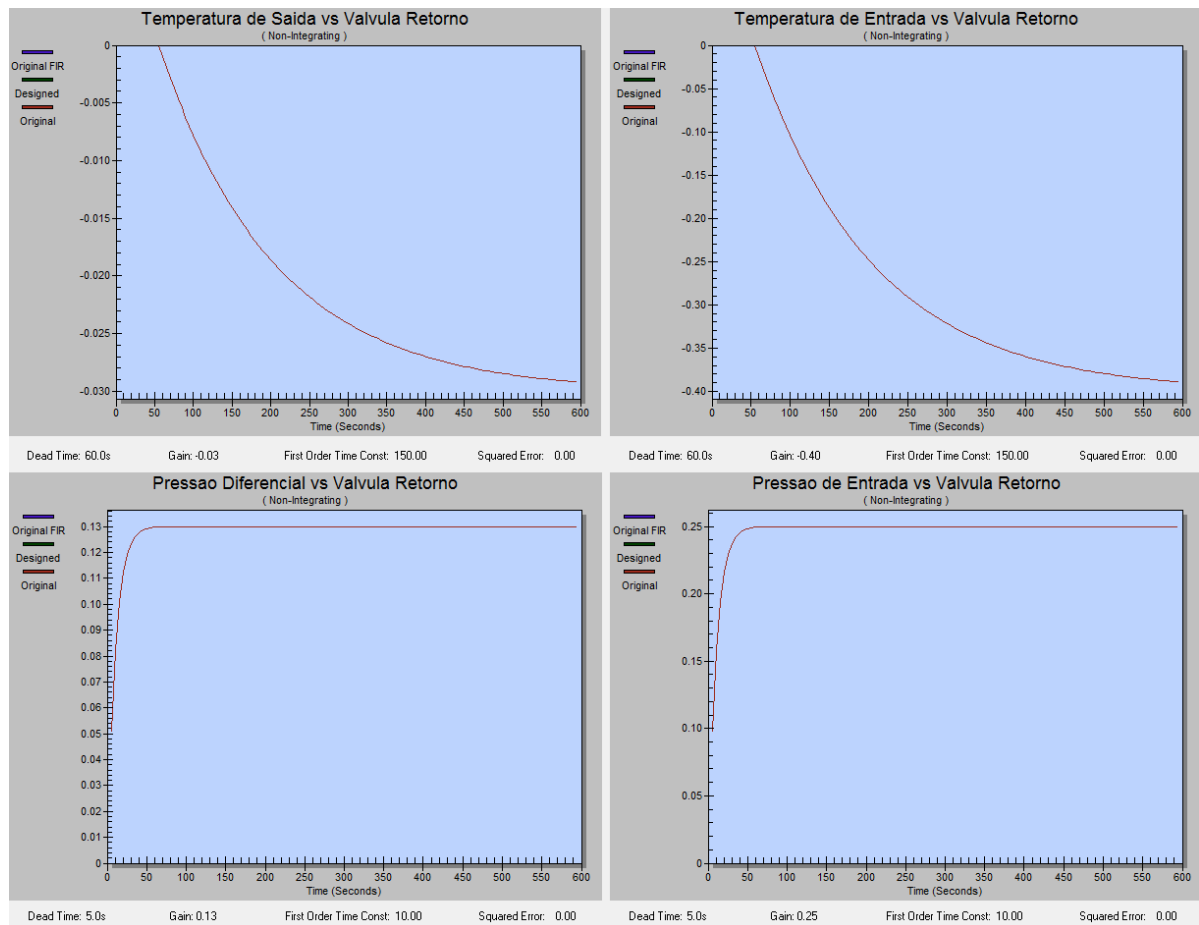


Figura 39 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Válvula da Chaminé



Fonte: Do Autor.

Figura 40 – Respostas individuais das variáveis controladas e restrições em relação a Válvula de Retorno



Fonte: Do Autor.

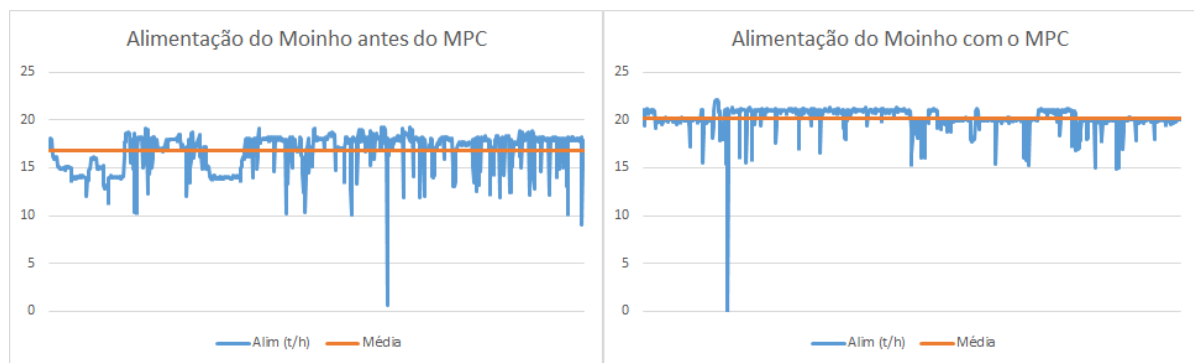
A aplicação DeltaV Predict ainda permite manipular as respostas individuais forçando um comportamento esperado movendo a curva para um ponto específico. Quando uma intervenção deste tipo é executada é necessário gerar um novo modelo e carregar na PCU.

### 3.3 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo, as técnicas de controle relacionadas ao controlador MPC apresentado anteriormente foram aplicadas utilizando-se um MPC industrial disponível no sistema DCS da planta. Para isso, foi necessário um planejamento com o time operacional para disponibilizar a planta para realização dos testes.

Com a nova proposta de controle, observou-se uma redução de aproximadamente 18% no consumo de energia do moinho e do ventilador de exaustão. Além disso, houve um aumento na alimentação média do moinho em 20% (Tabela 1) e uma clara redução na variabilidade do processo, ou seja, os pontos de medição registrados pelo sistema estão mais próximos do valor de referência (linha vermelha) como pode ser visto na Figura 41.

Figura 41 – Comparativo dos dados históricos de um período antes da implementação do MPC e após a implementação



Fonte: Do Autor.

Tabela 1 – Ganhos da implementação do MPC na planta de moagem de Carvão da Usina 4

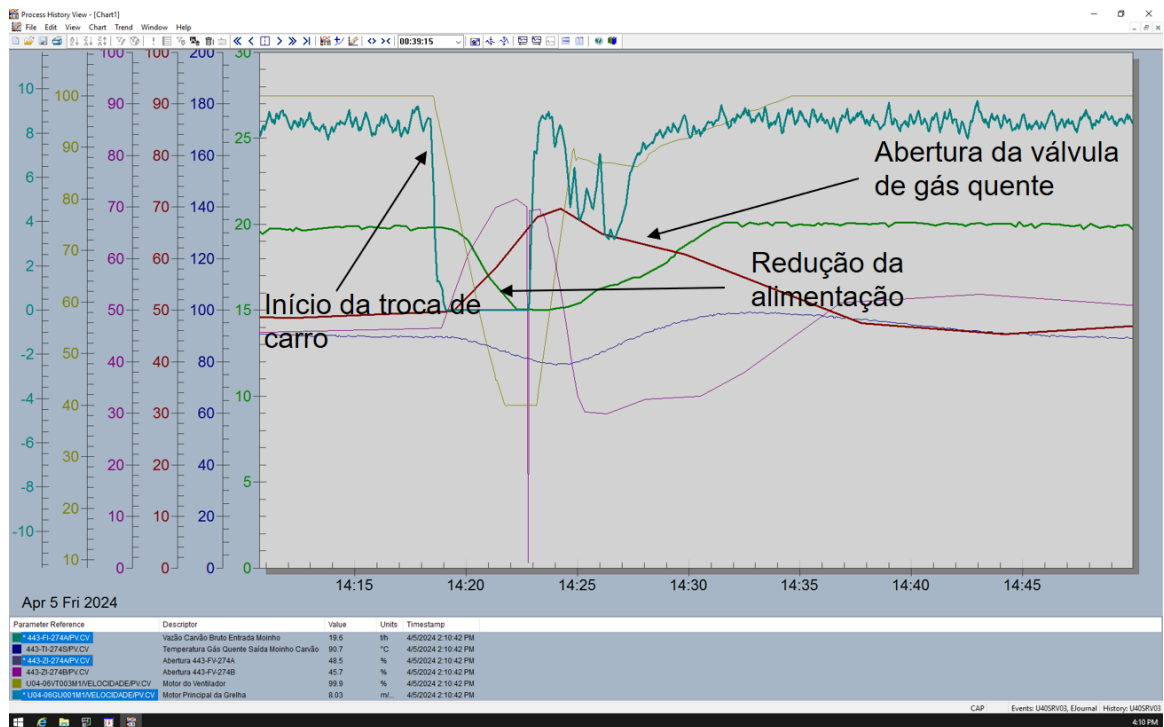
<b>MPC Carvão Usina 4</b>	<b>Resultados</b>
Média de Alimentação(t)	20,7%
Desvio de Temperatura de Saída	-52,4%
Desvio de Pressão de Entrada	-51,0%
Média da Corrente do Moinho(A)	7,2%
Média da Corrente do Ventilador(A)	0,3%
Consumo Específico Energia do VT e MV(kWh/t)	-18,1%

Fonte: Do Autor.

Com o MPC ligado, mesmo durante os períodos em que o forno (fonte de gás quente para o moinho) estava parado, o sistema consegue controlar a pressão de entrada e manter a temperatura de saída no ponto de operação desejado, sem reduzir a alimentação média, por até 30 minutos. Para efeito de comparação a Figura 42 e 43

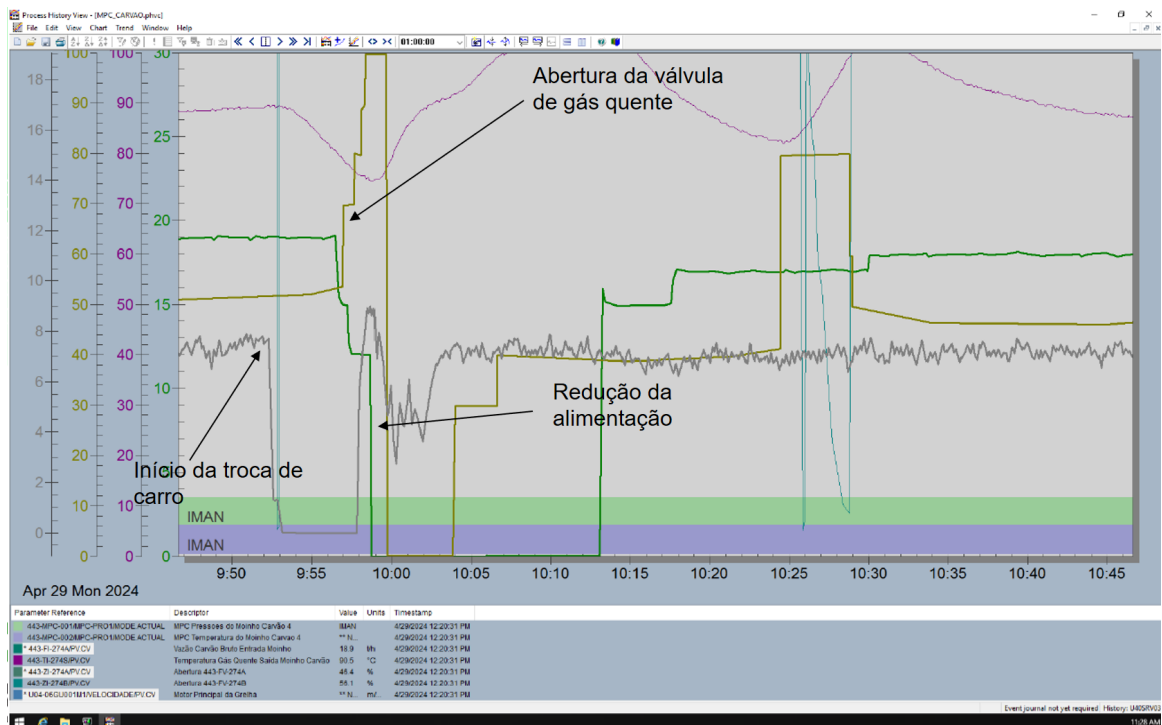
demonstram o comportamento da planta de carvão durante a troca de carro de grelha no forno com o MPC ligado e com o MPC desligado respectivamente). Após esse intervalo, a temperatura começava a diminuir, afetando a alimentação. É importante observar que o processo de moagem tinha anteriormente sua operação interrompida frequentemente durante paradas do forno de endurecimento.

Figura 42 – Controle pelo MPC durante troca de carro de grelha no forno



Fonte: Do Autor.

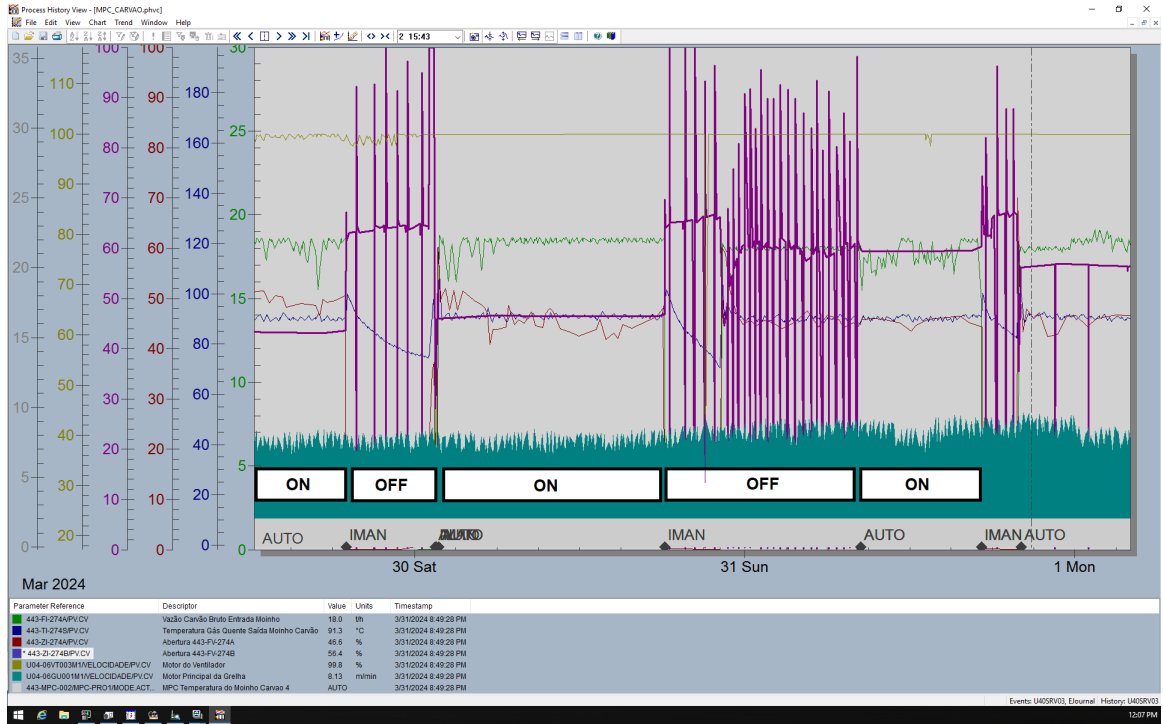
Figura 43 – Controle convencional durante troca de carro de grelha no forno



Fonte: Do Autor.

Para avaliar o desempenho do processo controlado pelo MPC, foram realizados experimentos comparando o controle da moagem usando PID e MPC. É observável que, com a moagem controlada por MPC em uma camada supervisória, são gerados valores ideais para os setpoints remotos das malhas de controle, o que contribui significativamente para a estabilização do processo. Considerando apenas o período em que o moinho já estava operando por pelo menos 30 minutos, foi realizada uma comparação estatística das variáveis mais importantes para o moinho, com o objetivo de avaliar os benefícios em termos de variabilidade e aumento da alimentação média. A comparação entre o controle preditivo ativo e o controle convencional ativo (Figura 44), utilizando dados coletados ao longo de um mês, revelou ganhos significativos.

Figura 44 – Comparativo ON-OFF do MPC



Fonte: Do Autor.

## 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvido um controlador preditivo industrial aplicado a uma linha do processo de moagem de carvão da Samarco, com o objetivo de reduzir a variabilidade e aumentar a alimentação média do moinho. Foram abordados os principais conceitos do Controlador Preditivo por Modelo (MPC) e utilizou-se dois blocos do tipo MPC Pro disponível na biblioteca de blocos do ambiente de desenvolvimento do sistema de controle.

Para investigar o controle, foi necessário negociar com a equipe de Engenharia de Processo e Operação a disponibilidade da planta para os testes em degrau para verificar o comportamento do processo. Posteriormente, desenvolveu-se uma aplicação com o controlador MPC no sistema DCS da planta. Essa aplicação industrial proporciona robustez ao controle e disponibilidade dos algoritmos que regem a operação da planta.

A etapa mais desafiadora do trabalho foi o ajuste dos parâmetros configuráveis, como pesos de entrada e saída e horizontes de controle e predição. Não há uma estratégia unificada e bem definida para a escolha desses parâmetros, e um mau ajuste pode inviabilizar o controle do processo.

O DeltaV Predict foi utilizado como ferramenta de suporte para o projeto do controlador preditivo.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, foram formuladas perguntas que ajudaram a alcançar os objetivos estabelecidos. As respostas são as seguintes:

1 - Qual é o desempenho do processo de moagem sendo controlado por MPC em uma camada supervisória?

- O desempenho do processo controlado por MPC foi avaliado por meio de experimentos comparativos entre controle por PID e por MPC. Concluiu-se que, com o MPC em uma camada supervisória, são gerados valores ideais para os setpoints remotos das malhas de controle e estabilizando o processo.

2 - A aplicação do MPC é capaz de reduzir o consumo específico de energia no processo de moagem?

- Foram avaliados indicadores de produção e consumo de energia, verificando-se uma melhora no controle do processo. Em momentos de queda brusca na alimentação da usina, houve uma redução de aproximadamente 18% no consumo específico de energia com o circuito sendo controlado por MPC. A variabilidade da alimentação do moinho também foi reduzida, resultando em uma média de alimentação maior do que com o controle PID.

A partir do projeto do MPC da Moagem de Carvão 4, foi possível aprender que a capacidade máxima do moinho é atingida com a máxima abertura da válvula de chaminé e mínima abertura da válvula de retorno. A pressão de entrada se mostrou um fator limitante, atingindo seu valor máximo no ponto de máxima alimentação. O MPC demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a compreensão do processo, levando o sistema ao ponto de operação mais lucrativo conforme os modelos matemáticos. O fluxo de gás é maximizado pela abertura total das válvulas, com a temperatura e a pressão hidráulica determinando a máxima eficiência na moagem. Constatou-se ainda que o moinho não será otimizado operando com o diferencial mais alto possível.

Existem várias possibilidades de aplicação de controle avançado no processo de beneficiamento mineral. Entre as soluções existentes, o MPC demonstra ser eficiente ao lidar com circuitos multivariáveis e os diversos acoplamentos entre as malhas de controle do processo. No entanto, é importante investir em instrumentação para possibilitar a leitura on-line de variáveis cruciais para a operação da planta e o sistema de controle automático.

Por fim, foi possível demonstrar a melhora do desempenho de um circuito complexo com a aplicação das técnicas de controle preditivo, servindo como referência para melhorias em outros processos na usina de pelotização. Os resultados reforçam a viabilidade de obter retornos qualitativos e quantitativos com a otimização de processos e a aplicação de controle avançado.



## REFERÊNCIAS

- CAMACHO, E. F. **Alba, CB. Model predictive control**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013.
- CASTRO, F.; BRAGA, M. Estudo comparativo entre controladores pid e mpc aplicados a moinhos de bolas para beneficiamento de minério. **ABMWeek**, 2018.
- EMERSON. **DCS DeltaV Versão 14**. 2023. Disponível em: <<https://www.emerson.com/>>. Acesso em: 15 de novembro 2023.
- EUZÉBIO, T. A. M. *et al.* Estudo e implementação de um algoritmo de avaliação de desempenho de malhas de controle sob uma referência dmc. Universidade Federal de Campina Grande, 2010.
- GEBR-PFEIFFER. **Moinho de carvão Vertical**. 2023. Disponível em: <<https://www.gebr-pfeiffer.com/pt/produtos/moinho-vertical-de-rolos-mps>>. Acesso em: 15 de novembro 2023.
- GUIMARÃES, J. F. Usar controle avançado é fácil... e lucrativo! **Revista Intech Brasil**, 2006.
- MEYER, K. Pelletizing of iron ores. **1ª Edição Düsseldorf**, 1980.
- O'DWYER, A. **Handbook of PI and PID controller tuning rules**. [S.l.]: Imperial College Press, 2009.
- PEREZ, J. M. G. T. **Controle preditivo robusto com realimentação de saída**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006.
- SILVA, A. M. Caracterização do processo de degradação de uma fibra de poliamida utilizada como meio filtrante na indústria mineral. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Rede Temática em . . . , 2006.
- TEIXEIRA, E. H. C. G. *et al.* **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. São Paulo: Editora Blucher, 2010.