

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO –  
UFES**

**ANÁLISE DO SISTEMA DE QUEIMA DO FORNO DA  
USINA DE PELOTIZAÇÃO NIBRASCO 6 PARA  
REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES NAS MALHAS DE  
CONTROLE DE PRESSÃO DE GÁS NATURAL**

**VINÍCIUS DALAPÍCULA BRAVIM**

**VITÓRIA – ES  
2010**

**VINÍCIUS DALAPÍCULA BRAVIM**

**ANÁLISE DO SISTEMA DE QUEIMA DO FORNO DA  
USINA DE PELOTIZAÇÃO NIBRASCO 6 PARA  
REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES NAS MALHAS DE  
CONTROLE DE PRESSÃO DE GÁS NATURAL**

Monografia apresentada ao Curso  
de Pós-Graduação da  
Universidade Federal do Espírito  
Santo como parte dos requisitos  
para a obtenção do título de  
especialista em Engenharia de  
Condicionamento /  
Comissionamento

**VITÓRIA – ES  
2010**

**VINÍCIUS DALAPÍCULA BRAVIM**

**ANÁLISE DO SISTEMA DE QUEIMA DO FORNO DA  
USINA DE PELOTIZAÇÃO NIBRASCO 6 PARA  
REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES NAS MALHAS DE  
CONTROLE DE PRESSÃO DE GÁS NATURAL**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Celso José Munaro**  
**Orientador**

---

**Prof Dr. Jussara Farias Fardin**  
**Examinador**

---

**Eng. Rosental Alves Gireli**  
**Examinador**

Vitória – ES – maio de 2010

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, meus exemplos.

## **AGRADECIMENTOS**

A Companhia Vale do Rio Doce pelas informações cedidas e utilizadas neste projeto.

Ao orientador Prof. Dr. Celso Munaro, por todo apoio e dedicação oferecida a este trabalho.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de Pelotização (RANGEL E MAGALHÃES, 2000) .....	17
Figura 2 - Usinas de Pelotização 1 a 4 – Complexo Industrial de Tubarão, Vitória/ES (CVRD, 2006).....	17
Figura 3 - Usinas de Pelotização 5 a 7 – Complexo Industrial de Tubarão, Vitória/ES (CVRD, 2006).....	18
Figura 4 – Forno de Pelotização e o Fluxo do Ar dos Ventiladores de Processo (CVRD, 2006).....	19
Figura 5 – O forno de pelotização da Usina 6 e o sistema de controle de gás natural.....	20
Figura 6 – Sistema de controle de pressão de gás natural da Usina 6 .....	21
Figura 7 – Representação do sistema 1 de controle pressão. ....	23
Figura 8 – Representação do sistema 1 de controle pressão. ....	23
Figura 9 – PV1 e SP1 (em kgf/cm <sup>2</sup> ) com tempo de amostragem T= 1s. ....	24
Figura 10 – PV2 e SP2 (em mmH <sub>2</sub> O) com tempo de amostragem T= 1s.....	24
Figura 11 – Pressão de saída (PV1) x Abertura da válvula 1 (MV1).....	26
Figura 12 – Pressão de saída (PV2) x Abertura da válvula 1 (MV2). ....	27
Figura 13 – Modelo do sistema de controle 1 e as variáveis envolvidas.....	28
Figura 14 – PV1 simulada x PV1 real.....	29
Figura 15 – Resposta ao degrau unitário em malha aberta. ....	30
Figura 16 – Inclusão do controlador PI no sistema 1. ....	30
Figura 17 – Resposta ao degrau unitário da FT considerado o controlador PI projetado. ....	31
Figura 18 – Resposta ao degrau unitário considerando-se a perturbação MV2. ....	31
Figura 19 – Malha de controle 1 com compensador <i>feedforward</i> .....	32
Figura 20 – PV1 simulada com a ação do compensador <i>feedforward</i> . ....	32
Figura 21 – Malha de controle 2 e as variáveis envolvidas. ....	33
Figura 22 – PV2 simulada x PV2 real.....	34
Figura 23 – Resposta ao degrau unitário em malha aberta. ....	35
Figura 24 – Sistema 2 com o controlador PI. ....	35
Figura 25 – Resposta ao degrau unitário para o controlador PI projetado. ....	36
Figura 26 – Resposta ao degrau unitário considerando-se a perturbação PV1. 36	
Figura 27 – Representação do Modelo 2 com o compensador <i>feedforward</i> ( <i>Gff2</i> ). ....	37
Figura 28 – PV2 simulada com a ação do bloco <i>feedforward</i> . ....	37
Figura 29 – Saída PV1 sem a atuação do <i>feedforward</i> ( <i>setpoint</i> de 4 kgf/cm <sup>2</sup> ). ....	38
Figura 30 – Saída PV1 com a atuação do <i>feedforward</i> ( <i>setpoint</i> de 4 kgf/cm <sup>2</sup> ). ....	38
Figura 31 – Saída PV2 sem a atuação do <i>feedforward</i> ( <i>setpoint</i> de 1200 mmH <sub>2</sub> O). ....	39
Figura 32 – Saída PV2 com a atuação do <i>feedforward</i> ( <i>setpoint</i> de 1200 mmH <sub>2</sub> O). ....	39



## **LISTA DE SIGLAS**

**PIMS** - Plant Information Management System

**TAG** – Código que identifica um equipamento ou componente

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	5
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	6
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	7
<b>RESUMO</b> .....	10
<b>ABSTRACT</b> .....	11
<b>1 - Introdução</b> .....	12
<b>2 – Justificativa</b> .....	13
<b>3 – Objetivos do Trabalho</b> .....	14
3.1 - Objetivo Geral.....	14
3.2 - Objetivos Específicos .....	14
<b>4 – O Processo de Pelotização</b> .....	15
4.1 - A Empresa.....	15
4.2 – O Processo de Pelotização.....	16
4.3 – Sistema de Queima dos Fornos de Pelotização .....	18
4.4 – Descrição do Sistema de Controle de Gás Natural .....	19
<b>5 – Análise</b> .....	22
5.1 - Metodologia .....	25
5.2 – Análise e Resultados .....	26
<b>6 – Conclusões</b> .....	40
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	43

## RESUMO

Oscilações em malhas de controle podem provocar perdas na qualidade do produto, no volume produzido, aumento nos gastos dos insumos, assim como o desgaste prematuro dos equipamentos. Estas oscilações são muitas vezes causadas por *stiction* em válvulas de controle, dimensionamento inadequado do coeficiente de vazão das válvulas, ou mesmo, estratégias de controle ineficientes. O objetivo deste trabalho é analisar o sistema de queima do forno de pelotização da Usina Nibrasco 6, buscando alternativas para a redução da oscilação nas malhas de controle de pressão de gás natural a partir de técnicas de modelagem de processo, projeto de controladores e verificação do desempenho dos equipamentos do sistema de controle. Os resultados obtidos em ambiente de simulação são apresentados.

## ABSTRACT

Control loop oscillations can damage product quality, produced capacity, input waste, and also the premature damage of equipments. These oscillations are often caused by control valves stiction, improper flow coefficient or even inefficient control strategies. The purpose of this work is analyse the burning system of Nibrasco 6 pelletizing plant, looking for options to decrease the natural gas pressure control loop oscillation through process modeling techniques, controller projects and also a performance verification of control loop equipments. The results obtained in a simulation environment are showed.

## **1 - Introdução**

A queima de gás natural no processo de pelotização é uma das formas de produzir calor para efetuar o tratamento térmico das pelotas de minério de ferro. A estabilidade na pressão de gás que abastecem os fornos de pelotização é fundamental para a estabilidade do processo de queima e qualidade do produto, já que a oscilação na pressão causa variação na vazão de gás que alimentam os queimadores do forno, os quais fazem parte do sistema de controle de temperatura. Perturbações na pressão do gás podem, inclusive, provocar paradas de produção por excederem valores de proteção do sistema, além do desgaste prematuro dos equipamentos.

O objetivo deste trabalho é analisar o sistema de queima do forno de pelotização da Usina Nibrasco 6, buscando alternativas para a redução da oscilação nas malhas de controle de pressão de gás natural a partir de técnicas de modelagem de processo, projeto de controladores e verificação do desempenho dos equipamentos do sistema de controle.

## **2 – Justificativa**

O consumo médio diário de gás natural de todas as sete usinas de pelotização do Complexo de Tubarão soma 1.300.000 m<sup>3</sup>/dia, o que representa a metade do consumo do estado do Espírito Santo.

Devido à relevância do consumo deste insumo e a importância da sua estabilidade de fornecimento para o processo e para a manutenção, torna-se viável analisar o sistema de queima do forno de pelotização da Usina Nibrasco 6, buscando meio para se reduzir a oscilação nas malhas de controle de pressão de gás natural.

### **3 – Objetivos do Trabalho**

#### ***3.1 - Objetivo Geral***

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento do sistema de queima do forno da usina de pelotização Nibrasco 6, a fim de se reduzir a oscilação nas malha de controle de pressão do gás natural.

#### ***3.2 - Objetivos Específicos***

Para se atingir este objetivo geral visa-se:

Estudar o processo de queima no forno de pelotização e equipamentos envolvidos;

Modelar o processo: Entender o funcionamento do processo e interdependência das variáveis envolvidas e elaborar o modelo;

Analizar as malhas de controle verificando o correto dimensionamento de equipamentos

Projetar de controladores e avaliar as estratégias de controle;

## 4 – O Processo de Pelotização

### 4.1 - A Empresa

Segundo CVRD A (2005), a Companhia Vale do Rio Doce foi constituída em 1942, tendo o intuito de explorar as minas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, deixando de ser estatal em 7 de maio de 1997, quando foi adquirida pelo Consórcio Brasil liderado pela Companhia Siderúrgica Nacional - CSN, que venceu o leilão realizado na Bolsa de Valores do Rio de Janeiro, adquirindo 41,73% das ações ordinárias do Governo Federal, por US\$ 3,338 bilhões. A CVRD é uma empresa de mineração diversificada, possuindo três focos principais de atuação: Mineração, Logística e Geração de Energia Elétrica. Ao longo de sua história, a Vale expandiu sua atuação do sudeste para as regiões nordeste, centro-oeste, norte do Brasil e em outros países, diversificando o portfólio de produtos minerais e consolidando a prestação de serviços logísticos (CVRD A, 2005). A empresa produz e exporta minério de ferro e pelotas. É responsável pelo controle de duas ferrovias brasileiras e participa de outras três, além de diversos terminais portuários. A Companhia produz matéria-prima essencial para indústrias no Brasil e no mundo. Seus minerais são utilizados desde a indústria siderúrgica até a agricultura. O principal produto da empresa é o minério de ferro, que é o mineral mais produzido e consumido no mundo, sendo que o Brasil possui uma das maiores reservas. Além de minério de ferro e pelotas, a Vale produz manganês, níquel, cobre, ferro-liga, ouro, bauxita, caulim, alumínio e alumina. Conforme a CVRD A (2005), a Vale possui atualmente operações em 14 estados brasileiros: Pará, Maranhão, Tocantins, Sergipe, Bahia, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Amazonas. No exterior, tem empresas controladas e coligadas nos Estados Unidos, Argentina, Chile, Peru, França, Noruega e Bahrain, e escritórios em Nova York, Bruxelas, Gabão, Tóquio e Xangai. O mercado consumidor da CVRD tem abrangência local, pois possui como um de seus principais clientes a Companhia Siderúrgica de Tubarão, e ainda abrangências nacional e internacional, uma vez que exporta seus produtos para mais de 30 países, incluindo o Japão.

#### **4.2 – O Processo de Pelotização**

Segundo Rangel e Magalhães (2000), a pelotização é um processo de aglomeração surgido em 1911, na Suécia, que por meio de um tratamento térmico, converte a fração ultrafina gerada no beneficiamento do minério de ferro (abaixo de 0,149 mm) em esferas denominadas pelotas, pois, no final do século XIX, havia surgido o processo de sinterização que se encarregava somente da aglomeração dos finos. As pelotas são padronizadas com diâmetro nominal variando entre 8 e 18 mm, sendo compostas basicamente de minério de ferro, calcário, carvão, cal, bentonita ou peridur, água e bauxita, sendo essa pelota um produto intermediário para produção de aço. Existem no Brasil somente dois fabricantes de pelotas, a Companhia Vale do Rio Doce e a Samarco, e no mundo, a LKAB na Austrália, a QCM e IOC no Canadá e Kutremuck na Índia. As pelotas da CVRD têm alta resistência mecânica e características metalúrgicas apropriadas, pois são submetidas a um processo térmico que envolve etapas de secagem, pré-queima, queima, pós-queima e resfriamento, que garantem a qualidade do produto final. A produção de pelotas é contínua, em grande escala, com milhares de toneladas por dia utilizando equipamentos, máquinas e materiais com avançadas tecnologias.

A formação de pelotas cruas, que é conhecida por pelotamento, tem por objetivo produzir pelotas numa faixa de tamanho apropriada e com resistência mecânica suficiente para suportar as etapas de transferência e transporte entre os equipamentos de pelotamento e o de tratamento térmico. Posteriormente as pelotas são submetidas ao processo térmico conforme mostrado na figura 1.

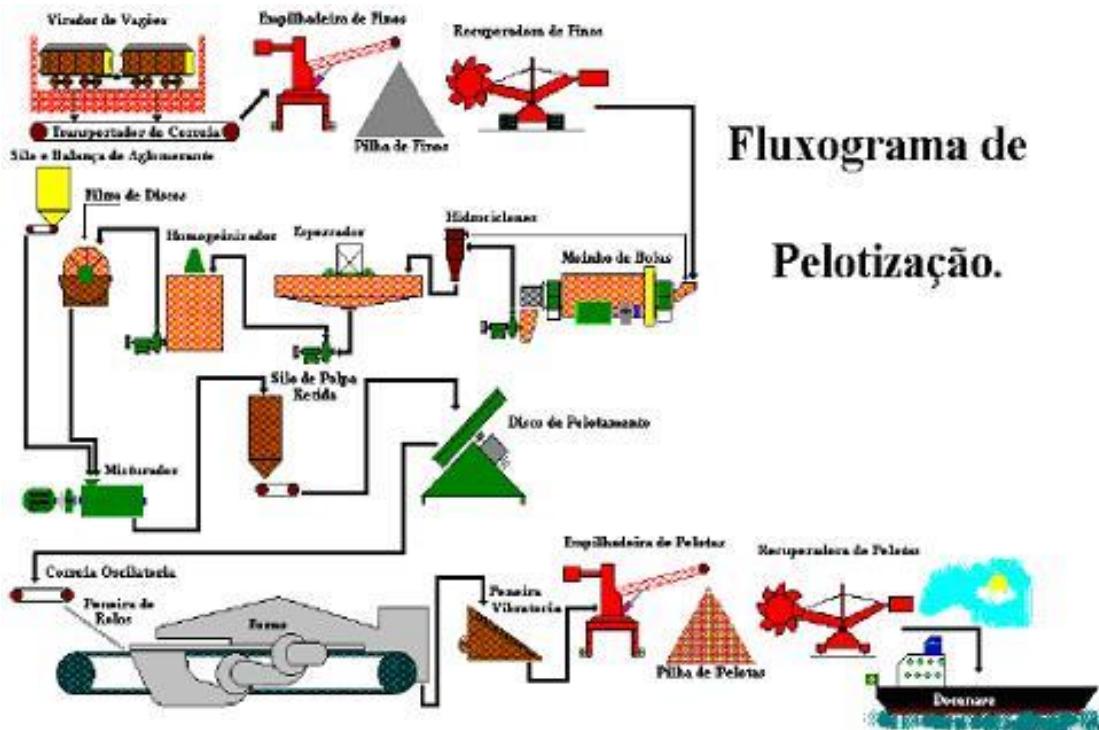


Figura 1 – Processo de Pelotização (RANGEL E MAGALHÃES, 2000).

Após o término do processo de pelotização, as pelotas são enviadas, de acordo com pedidos de clientes, através de navios, não necessitando e nem dispondo de embalagens apropriadas. As figuras 2 e 3 mostram uma visão geral das sete usinas de pelotização localizadas no Complexo Industrial de Tubarão, que possuem uma capacidade anual de 25 milhões de toneladas de pelotas.

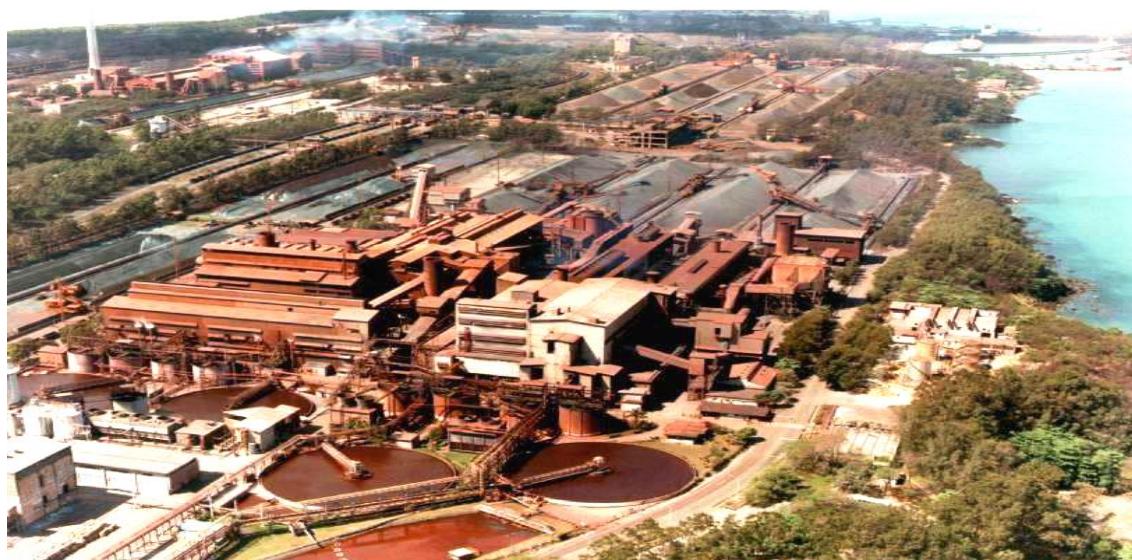


Figura 2 - Usinas de Pelotização 1 a 4 – Complexo Industrial de Tubarão, Vitória/ES (CVRD, 2006).



**Figura 3 - Usinas de Pelotização 5 a 7 – Complexo Industrial de Tubarão, Vitória/ES (CVRD, 2006).**

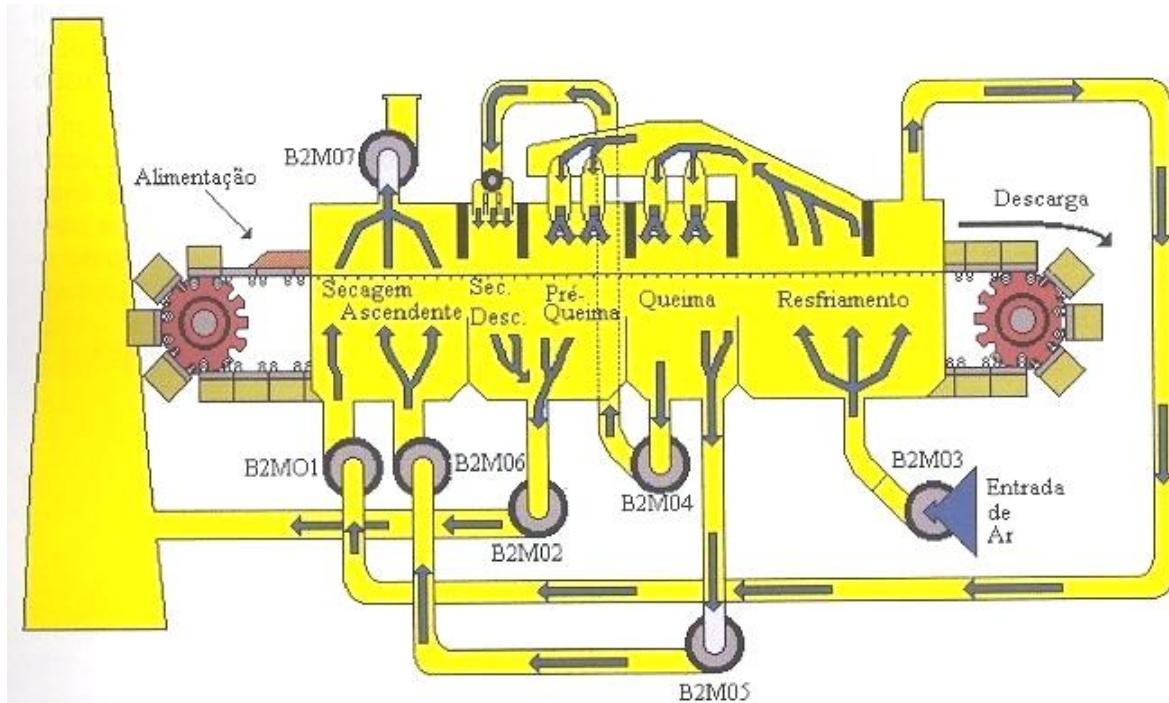
#### **4.3 – Sistema de Queima dos Fornos de Pelotização**

Para que as pelotas formadas nos discos de pelotização possam resistir às operações de manuseio e transporte até o cliente, ou seja, transporte para o pátio, carregamento e posterior descarregamento de navios, e para que suportem às pressões e aos choques térmicos dentro do forno do cliente, durante sua transformação em ferro gusa (Alto Forno) ou ferro esponja (Redução Direta), torna-se necessário submetê-las a um tratamento térmico cuidadoso e bem balanceado, proporcionando às mesmas as resistências física e mecânica apropriadas. A esse tratamento dá-se o nome de processo de endurecimento ou processo de queima, o qual é realizado no forno de endurecimento ou forno de pelotização. As pelotas cruas são transportadas ao longo do forno através de um sistema de carros de grelha, que conduz as pelotas a todas as zonas do forno:

- Secagem ascendente I
- Secagem ascendente II
- Secagem descendente
- Pré-queima
- Queima

- Resfriamento primário
- Resfriamento secundário

Cada uma destas etapas ocorre numa região ou zona específica existente no forno de endurecimento, conforme ilustra a figura 4.



**Figura 4 – Forno de Pelotização e o Fluxo do Ar dos Ventiladores de Processo (CVRD, 2006).**

#### **4.4 – Descrição do Sistema de Controle de Gás Natural**

Para se realizar o tratamento térmico da pelota é necessário o aquecimento do forno, que possui um perfil adequado de temperatura em cada zona de queima. Para este sistema de aquecimento é utilizado gás natural. Pela figura 5, podemos visualizar a tubulação que abastece os queimadores do forno da Usina Nibrasco 6 com gás natural (cor amarela).

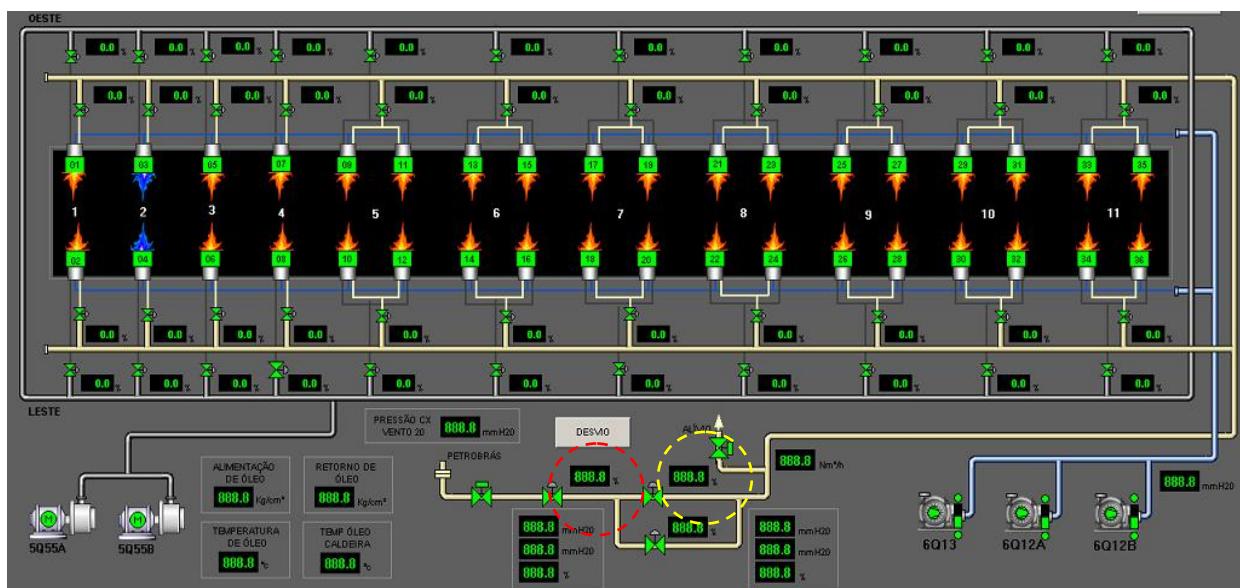


Figura 5 – O forno de pelotização da Usina 6 e o sistema de controle de gás natural.

O gás é fornecido à Usina Nibrasco 6 com uma pressão média de 10 kgf/cm<sup>2</sup>. Uma primeira válvula de controle (TAG 1362, circulada em vermelho na figura 5) faz a primeira redução de pressão (4 kgf/cm<sup>2</sup>). Uma segunda válvula de controle (TAG 1361, circulada em amarelo na figura 5) reduz a pressão de 4 kgf/cm<sup>2</sup> para 0,120 kgf/cm<sup>2</sup>, valor fornecido às válvulas dos grupos de queima (ver figura 6). Cada grupo de queima tem de 2 a 4 queimadores, contendo cada grupo um par de válvulas de controle (uma de cada lado do forno), que controlam a temperatura do grupo. Cada grupo também contém um conjunto de termopares que informam a temperatura média daquela região, fazendo o controle de abertura das válvulas.

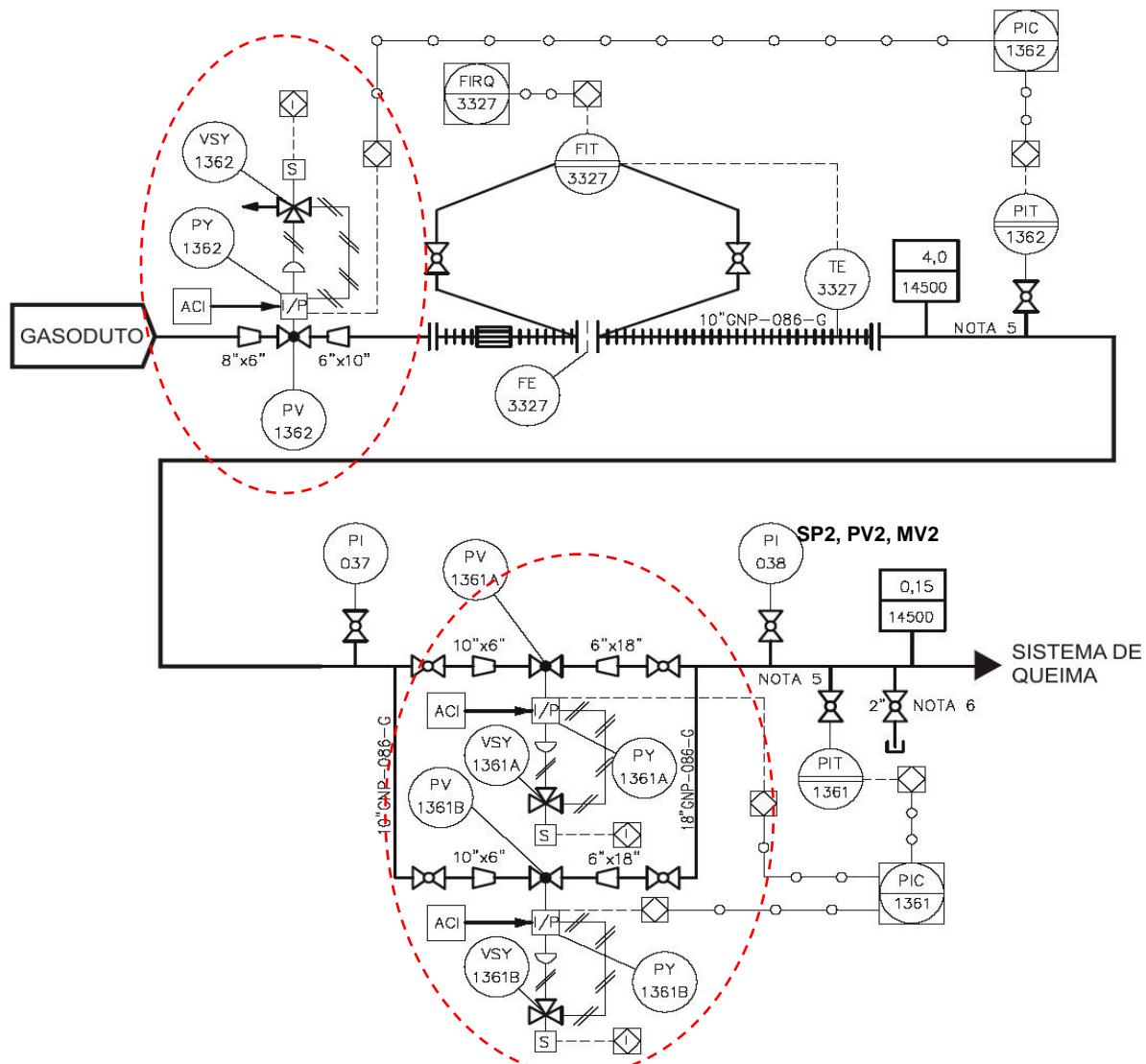


Figura 6 – Sistema de controle de pressão de gás natural da Usina 6.

## 5 – Análise

Podemos definir o sistema de controle de pressão da seguinte forma:

Sistema 1: primeira redução de pressão. setpoint em 4 kgf/cm<sup>2</sup>;

Sistema 2: segunda redução de pressão: setpoint em 1200 mmH2O (ou 0,120 kgf/cm<sup>2</sup>);

Para cada sistema tem-se os seguintes componentes:

- 1) Válvula de controle;
- 2) Posicionador;
- 3) Transmissor de pressão na saída da válvula.

Para o sistema 1 e 2, tem-se as seguintes variáveis:

**Tabela 1 – Variáveis do sistema de controle de pressão do gás Usina 6.**

	Variável	Unidade
Sistema 1	PE1 - Pressão do gás na entrada	kgf/cm <sup>2</sup>
	SP1 – Set point da válvula 1	kgf/cm <sup>2</sup>
	PV1 – Pressão na saída da válvula 1	kgf/cm <sup>2</sup>
	MV1 – Abertura da válvula 1	%
Sistema 2	SP2 – Set point da válvula 2	mmH2O
	PV2 – Pressão na saída da válvula 2	mmH2O
	MV2 – Abertura da válvula 2	%

As variáveis podem ser visualizadas nas figuras 7 e 8.

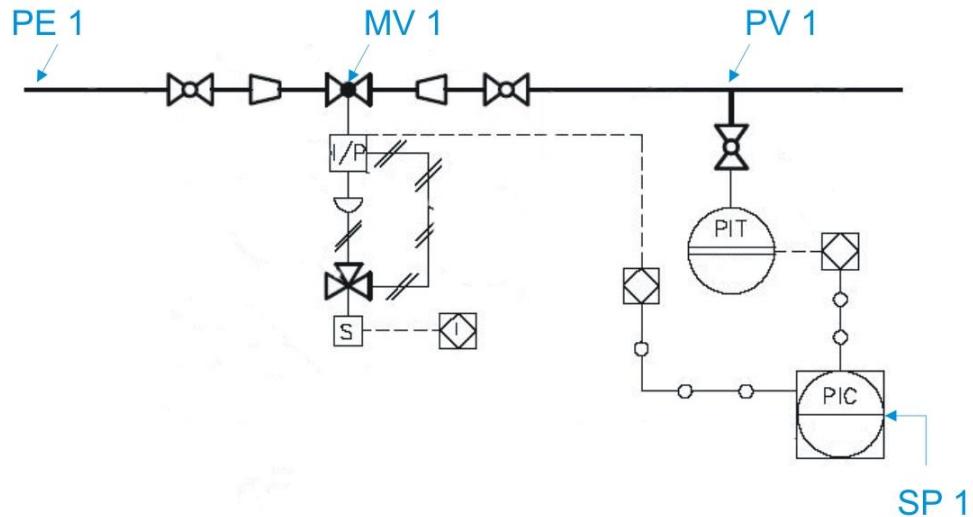


Figura 7 – Representação do sistema 1 de controle pressão.

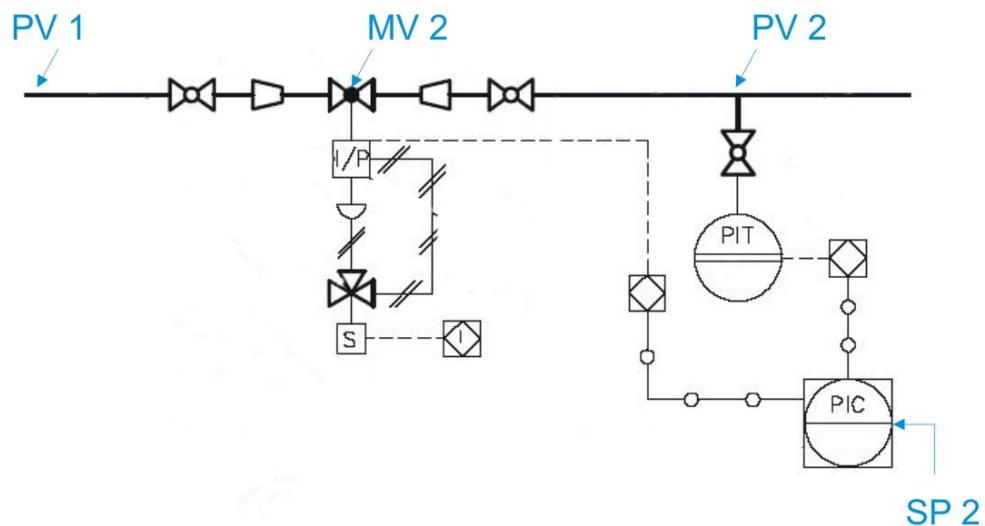


Figura 8 – Representação do sistema 1 de controle pressão.

Observando a figura 9, podemos ver o comportamento da variável PV1 com tempo de amostragem  $T=1s$ .

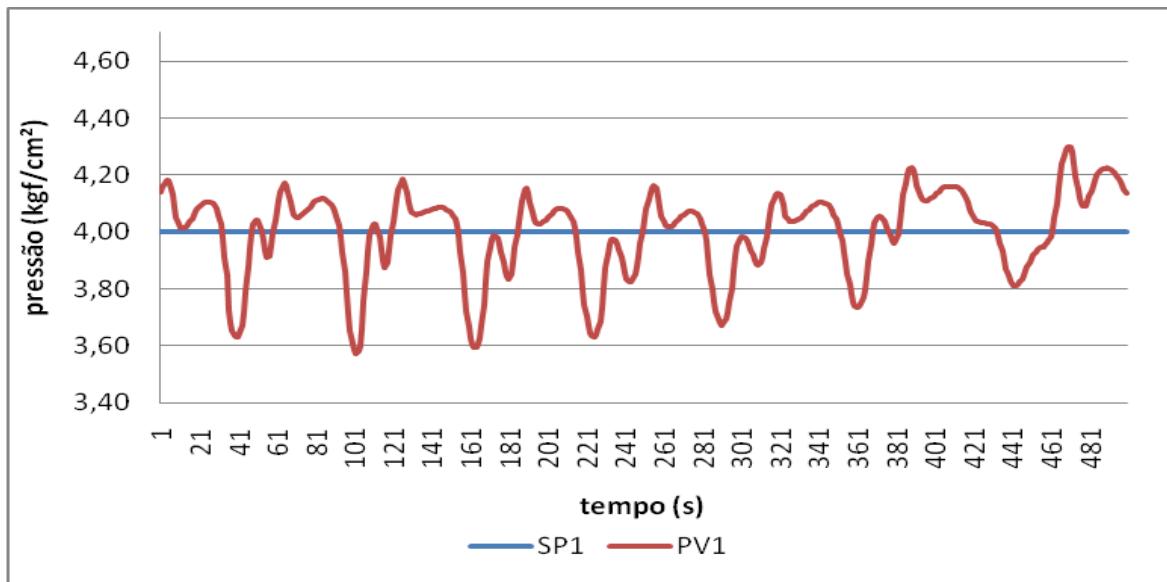


Figura 9 – PV1 e SP1 (em kgf/cm<sup>2</sup>) com tempo de amostragem T= 1s.

Observando a figura 10, é possível verificar o comportamento da variável PV2 com tempo de amostragem T=1s.

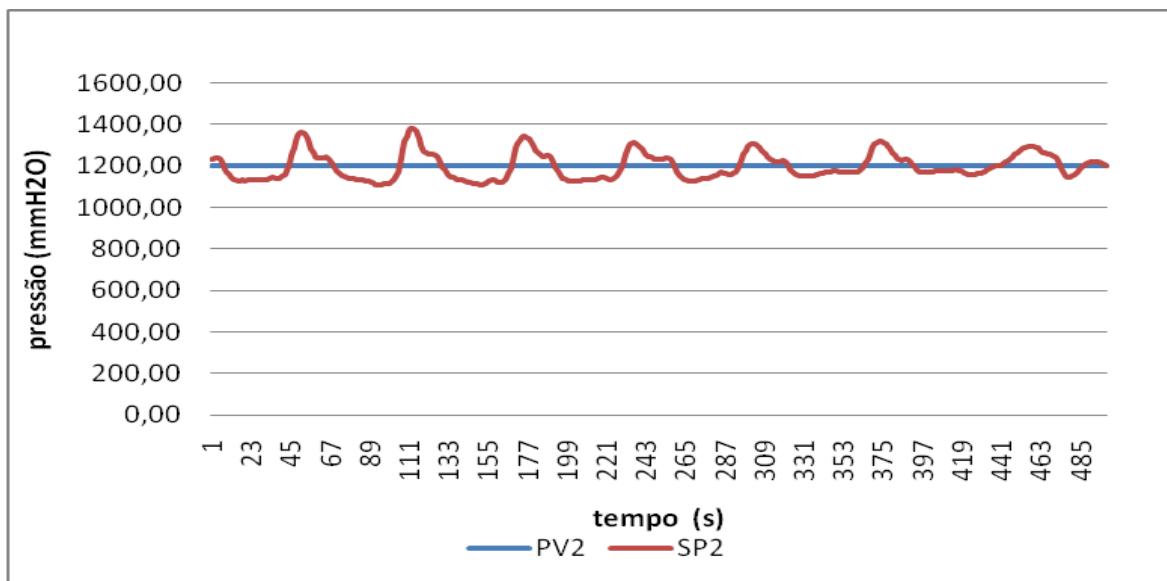


Figura 10 – PV2 e SP2 (em mmH<sub>2</sub>O) com tempo de amostragem T= 1s.

A partir das figuras 9 e 10 nota-se a oscilação nas variáveis de pressão PV1 e PV2 para os setpoints SP1 e SP2 estabelecidos. É um indicativo que o sistema atual de controle não funciona adequadamente.

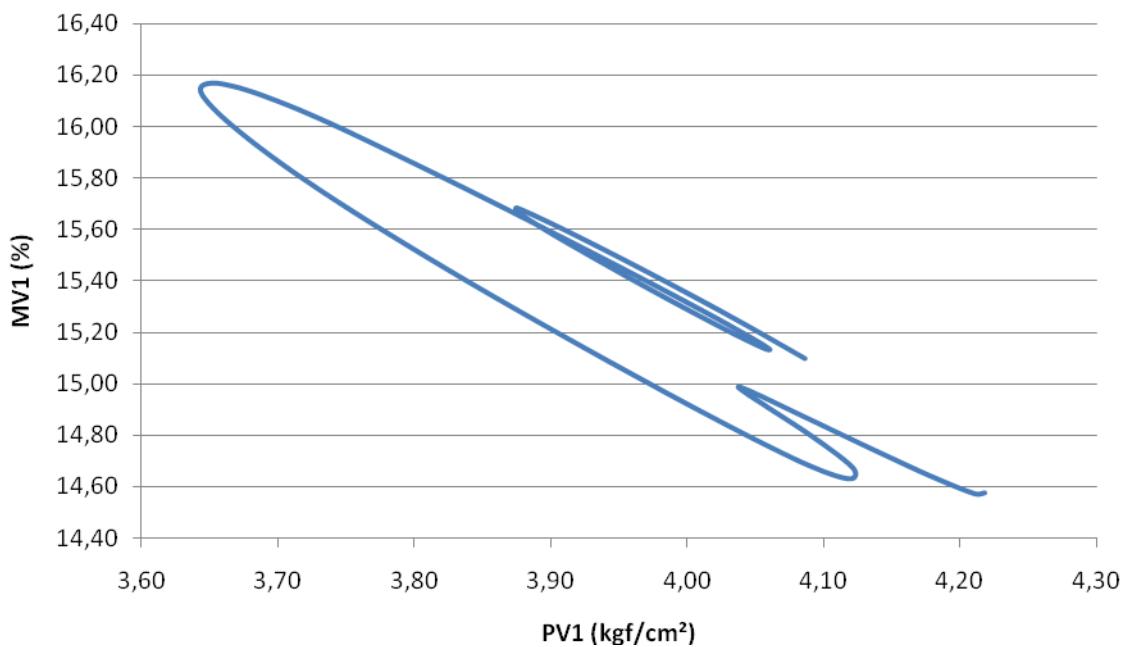
### **5.1 - Metodologia**

Para se analisar este processo foi coletado na Usina 6 500 amostras das variáveis do processo PE1, PV1, SP1, MV1, PV2, SP2 e MV2 no dia 14/09/2009, com tempo de amostragem  $T=1s$ . Com esses dados, os sistemas 1 e 2 serão modelados utilizando o software Matlab. A partir dos modelos e da verificação dos componentes (válvulas de controle e periféricos) serão analisadas soluções para se reduzir as oscilações.

## 5.2 – Análise e Resultados

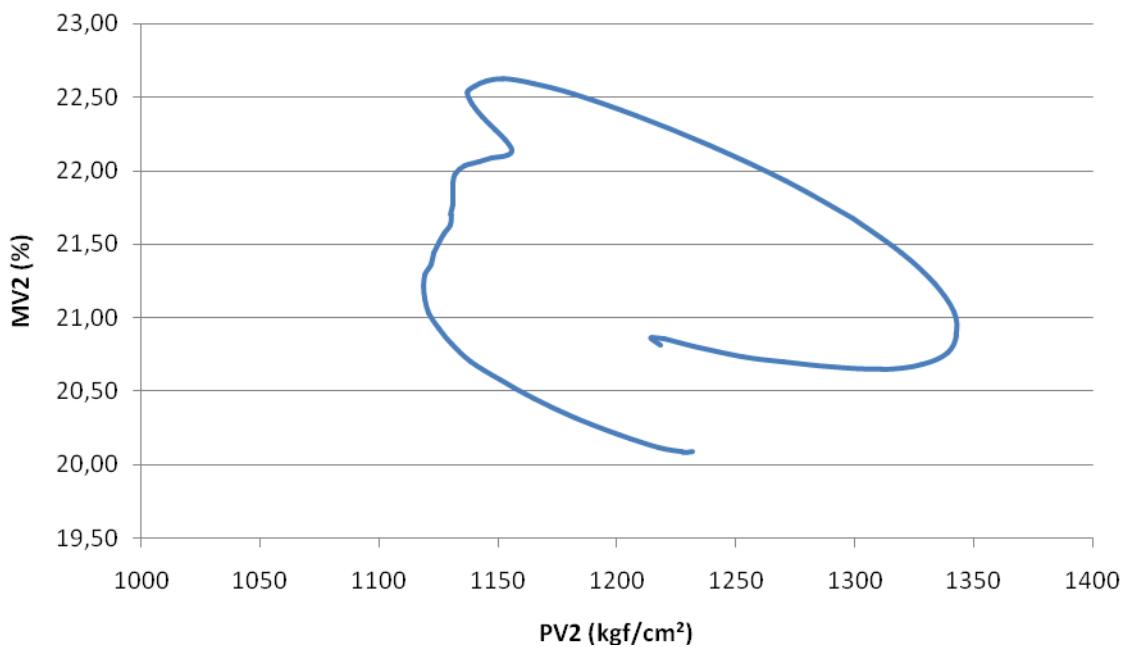
A primeira análise consiste em avaliar PV1 em função de MV1. A partir dos dados coletados, nota-se que para uma variação de 0,60 kgf/cm<sup>2</sup> em PV1 a válvula varia 1,60 pontos percentuais na sua abertura. Isto demonstra uma faixa muito restrita de operação, fator que afeta diretamente o controle da válvula (conforme figura 11) uma vez que ela irá operar em uma região de alto ganho.

Outro ponto observado é que, para um mesmo valor de pressão PV1, existe mais de um valor de abertura da válvula MV1. Este tipo de comportamento indica a possibilidade de atrito da válvula, tornando sua resposta não-linear e dificultando o controle (Choudhury, 2008).



**Figura 11 – Pressão de saída (PV1) x Abertura da válvula 1 (MV1).**

O mesmo comportamento ocorre para a válvula 2. Pela figura 12 é possível notar a estreita faixa de operação (entre 20 e 22,60% de abertura), além de existir mais de um valor de abertura de válvula MV2 para um mesmo valor de pressão PV2.



**Figura 12 – Pressão de saída (PV2) x Abertura da válvula 1 (MV2).**

O segundo passo consiste na modelagem. Usaremos o método direto de identificação em malha fechada (Forssell, Ljung, 1999) pela dificuldade em realizar o teste de degrau com o processo em modo manual. Como SP1 é constante, MV1 pode estar muito correlacionada com MV2 e PV1, dificultando ou até impedindo a obtenção do modelo. A existência de não linearidades em G11 (válvula de controle) pode contribuir para garantia da obtenção do modelo, reduzindo esta correlação.

Uma forma de verificar se os parâmetros do modelo podem ser obtidos através do método dos mínimos quadrados, é calcular os valores singulares da matriz  $\varphi^T \varphi$ , sendo  $\varphi$  o vetor de regressores usado para calcular o vetor de parâmetros  $\theta$ , dado por

$$\theta = [\varphi^T \varphi]^{-1} \varphi \quad (\text{Forssell, Ljung, 1999})$$

Para o caso do modelo usando MV1 e PV1, temos que os valores singulares são:

$$\Sigma([\varphi^T \varphi]) = \{5.6055, 190.3677\}$$

indicando que os dados permitem os parâmetros do modelo podem ser calculados.

Para o caso do modelo usando MV2 e PV2, temos que os valores singulares são

$$\Sigma([\varphi^T \varphi]) = \{373.7709, 2.054e+6\}$$

Que também permitem o cálculo da inversa da matriz. A diferença significativa entre os valores singulares se deve à diferença das magnitudes máximas dos sinais MV2 e PV2, dados respectivamente por 1.6494 e 184.2927, mas ela não impede o cálculo da inversa e assim, do vetor de parâmetros  $\theta$ .

Podemos então definir o modelo do sistema 1 conforme a figura 13 abaixo:

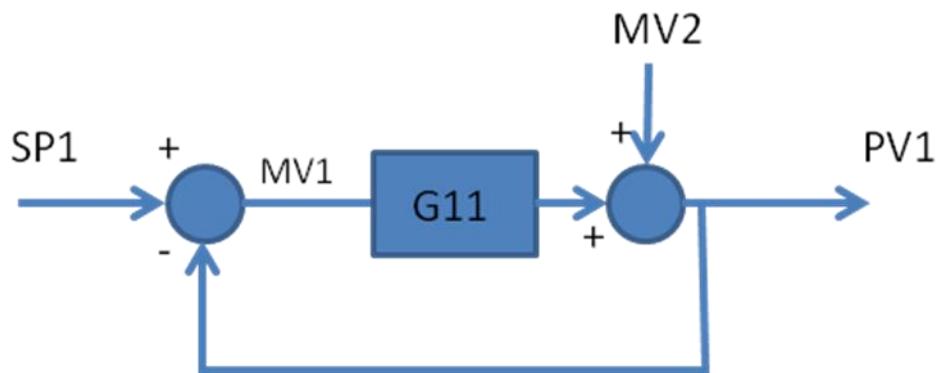


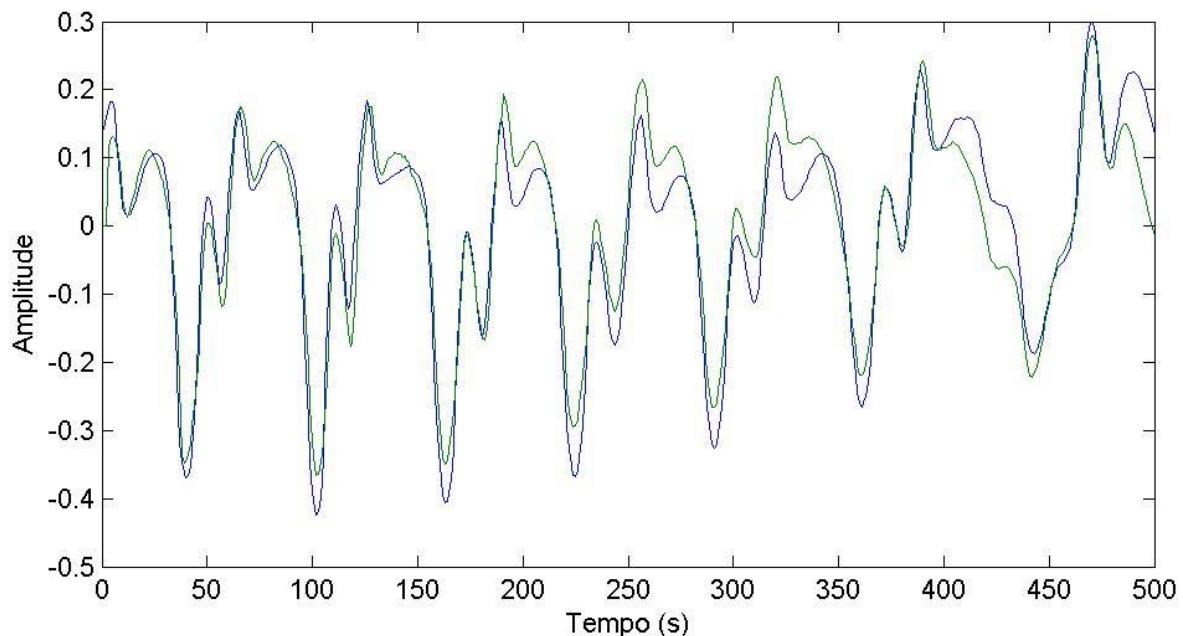
Figura 13 – Modelo do sistema de controle 1 e as variáveis envolvidas.

A partir as amostras coletadas de cada variável, modelou-se PV1 relacionando MV1, PV1 relacionando PE1, PV1 com MV2 e PV1 com MV1 e MV2. A modelagem foi feita a fim de se descobrir o grau de influência de cada variável do processo com relação ao comportamento da variável PV1. O primeiro modelo mostrou que PE1 está pouco relacionada com saída PV1. A variação em PE1 é muito lenta comparada com a variação em PV1 e, portanto, foi descartada. As demais simulações mostram o relacionamento de PV1 com MV1 e MV2 de forma independente e também de forma simultânea. Os melhores resultados se mostraram com PV1 em função de MV1 e MV2 simultaneamente, o que levou a adoção deste modelo (menor erro). A tabela 2 abaixo mostra os erros (*loss function*) da PV1 simulada comparada com os dados reais, e justificam o modelo escolhido (OP=4).

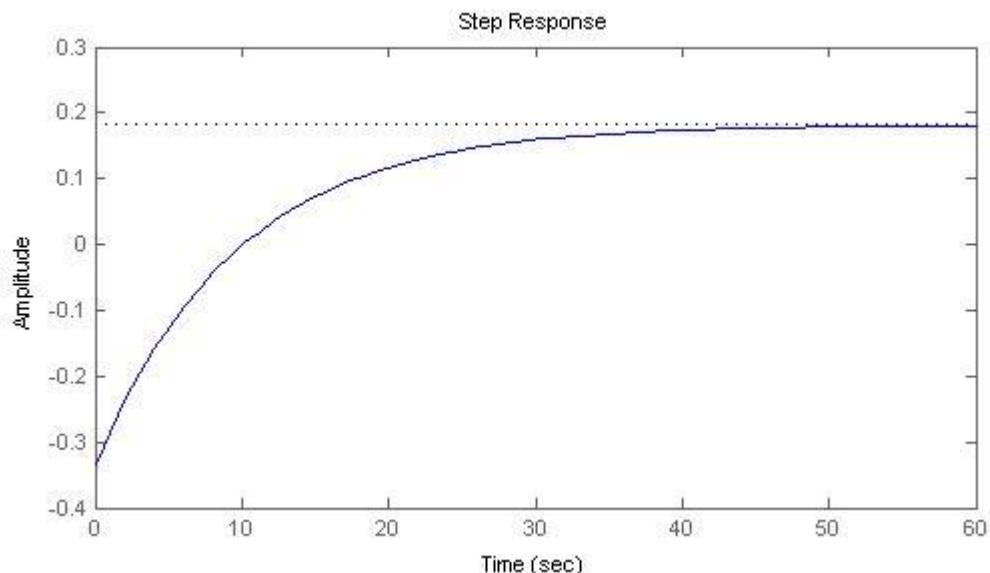
**Tabela 2 – Erro do PV1 simulado comparado com a PV1 real nos diversos modelos.**

OP	Em função de	Loss Function	FPE	Função de Transferência
1	<b>MV1</b>	<b>0.00026176</b>	<b>0.00026492</b>	$-0.2952 s + 0.005623$ ----- $s + 0.08234$
2	<b>MV2</b>	<b>0.000744617</b>	<b>0.000753607</b>	$-0.06926 s - 0.002037$ ----- $s + 0.02445$
3	<b>PE1</b>	<b>0.000782212</b>	<b>0.000791655</b>	$-0.06065 s + 0.006212$ ----- $s + 0.01902$
4	<b>MV1 e MV2</b>	<b>0.000160194</b>	<b>0.00016343</b>	$-0.3373 s + 0.0189$ $G11 = \frac{-----}{s + 0.104}$ $0.1044 s - 0.0114$ $G21 = \frac{-----}{s + 0.104}$

Podemos ver o comportamento de PV1 em função de MV1 e MV2 comparada com PV1 real pela figura 14. Foi utilizado para modelagem o método dos mínimos quadrados (subtraindo-se a média das variáveis envolvidas) com modelo arx que foi convertido para um modelo no tempo contínuo.

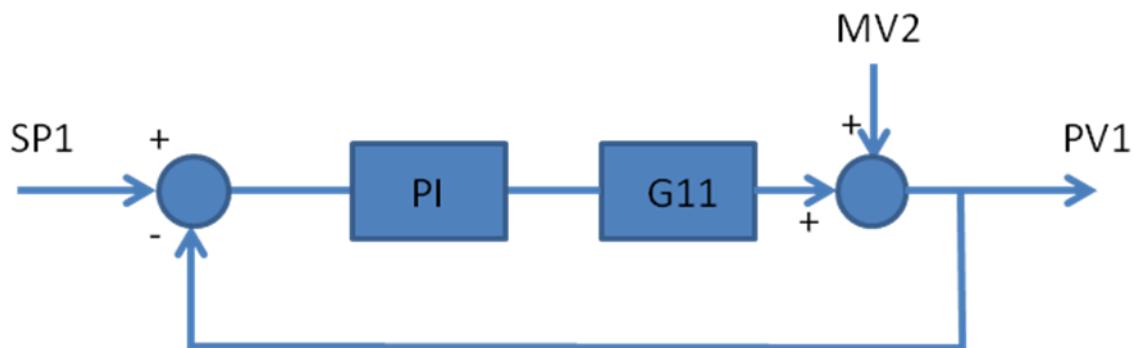
**Figura 14 – PV1 simulada x PV1 real.**

A resposta ao degrau unitário do modelo em malha aberta pode ser vista pela figura 15.

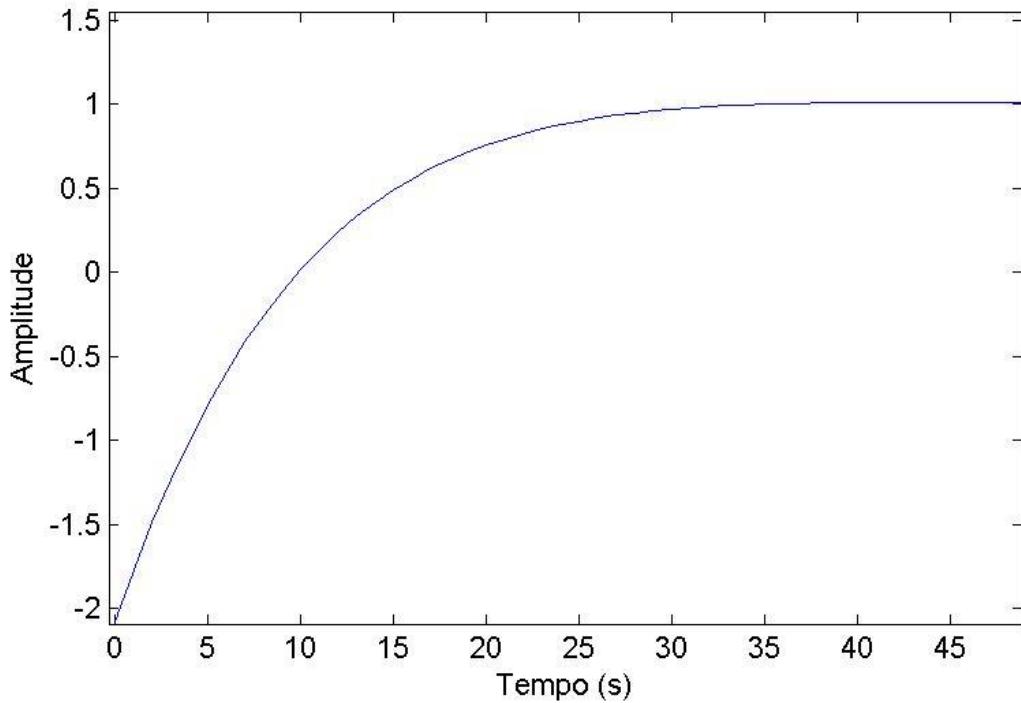


**Figura 15 – Resposta ao degrau unitário em malha aberta.**

Este modelo foi utilizado para o projeto do controlador PI utilizando-se o método do lugar das raízes (Åström, 2005). Para  $K_P=2$  e  $K_I=0,22$ , temos a resposta mostrada na figura 17.

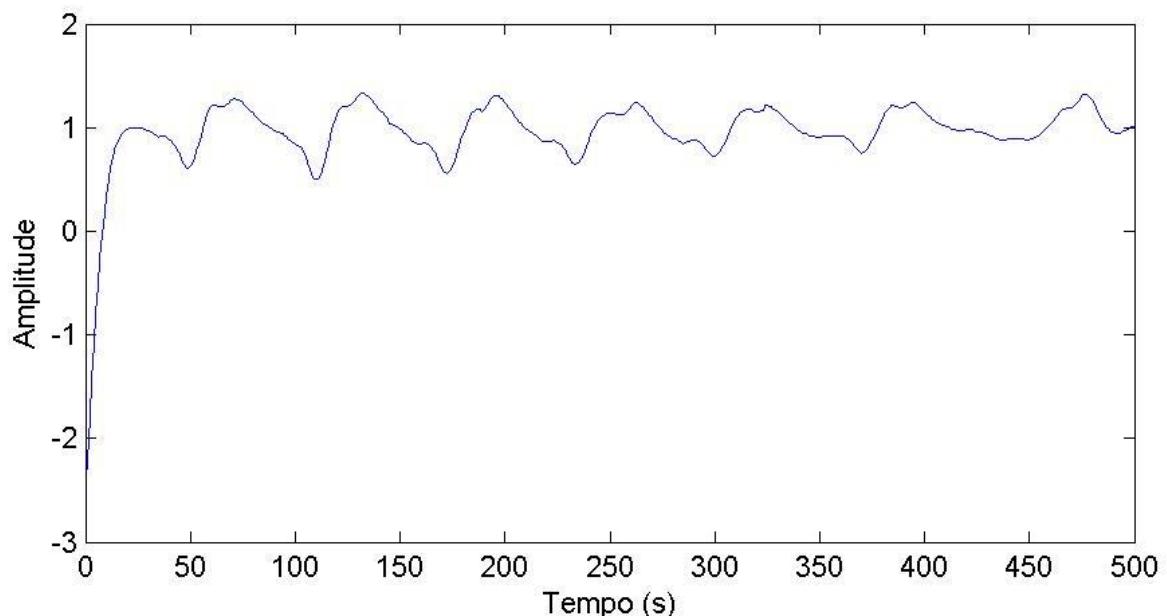


**Figura 16 – Inclusão do controlador PI no sistema 1.**



**Figura 17 – Resposta ao degrau unitário da FT considerado o controlador PI projetado.**

Neste caso considera-se somente PV1 em função de MV1, ou seja, despreza-se o efeito de MV2 sobre PV1. Introduzindo o efeito de MV2 como uma perturbação, resulta o comportamento observado na figura 18.



**Figura 18 – Resposta ao degrau unitário considerando-se a perturbação MV2.**

Observa-se que o sinal de controle MV2 aplicado à malha de controle de PV2 produz um comportamento oscilatório sobre a malha de PV1.

Para reduzir este efeito foi projetado um compensador *feedforward* Gff1, que pode ser visto na figura 19. O resultado da ação deste compensador pode ser observado na figura 20.

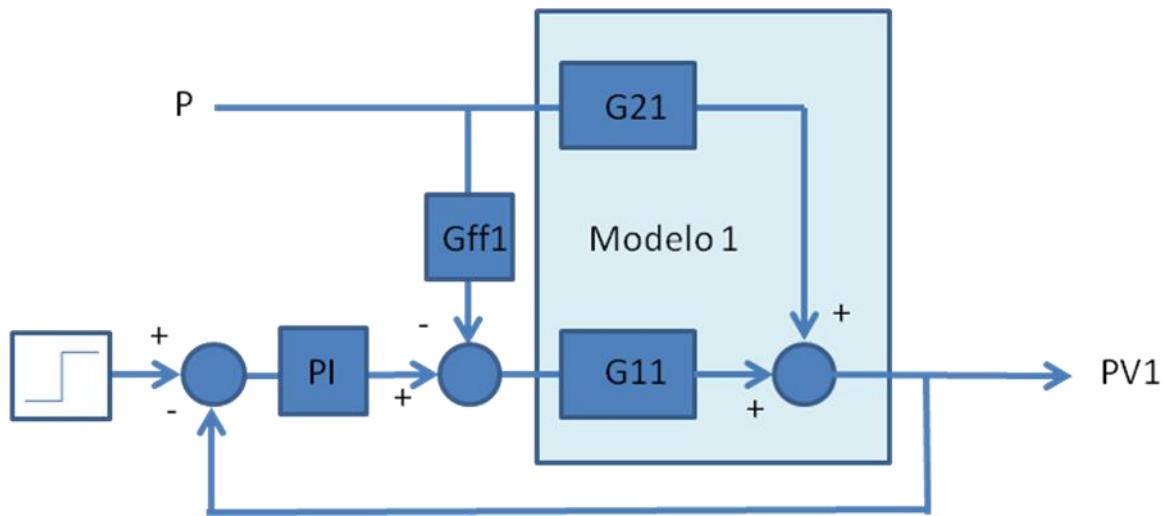


Figura 19 – Malha de controle 1 com compensador *feedforward*.

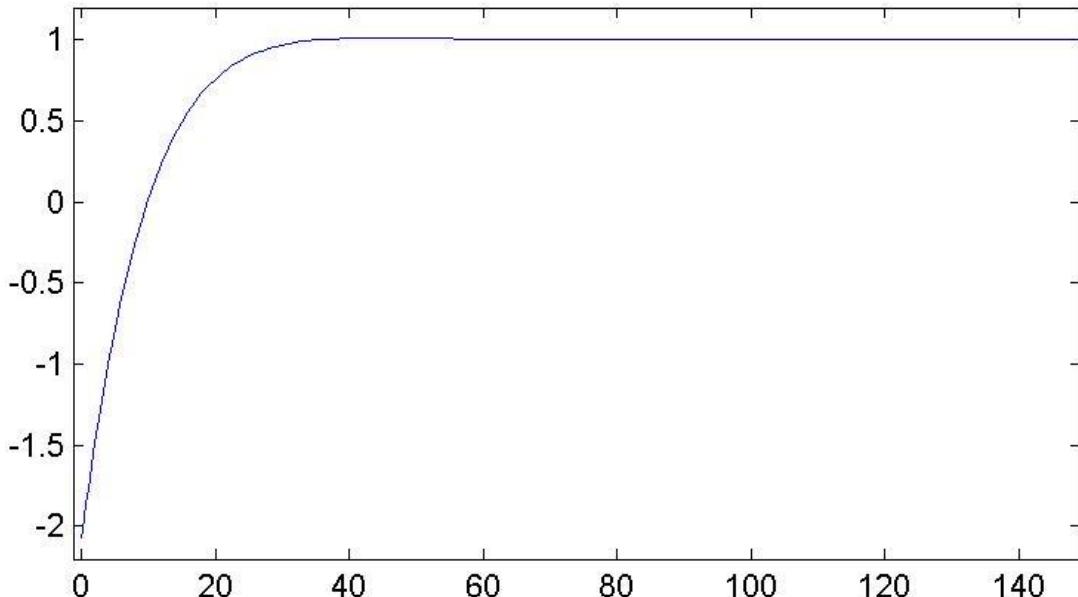


Figura 20 – PV1 simulada com a ação do compensador *feedforward*.

O compensador *feedforward*  $Gff1$  é calculado da seguinte forma:

$$Gff1(s) = -\frac{G21(s)}{G11(s)} = -0.3105$$

onde

$$G21(s) = \frac{0.1044 s - 0.0114}{s + 0.104} \quad (\text{FT do distúrbio})$$

$$G11(s) = \frac{-0.3373 s + 0.0189}{s + 0.104} \quad (\text{FT do processo})$$

A segunda etapa consiste em realizar os mesmos procedimentos executados no modelamento do sistema 1 para modelarmos o sistema 2. Representou-se o modelo do sistema 2 conforme a figura 21 abaixo.

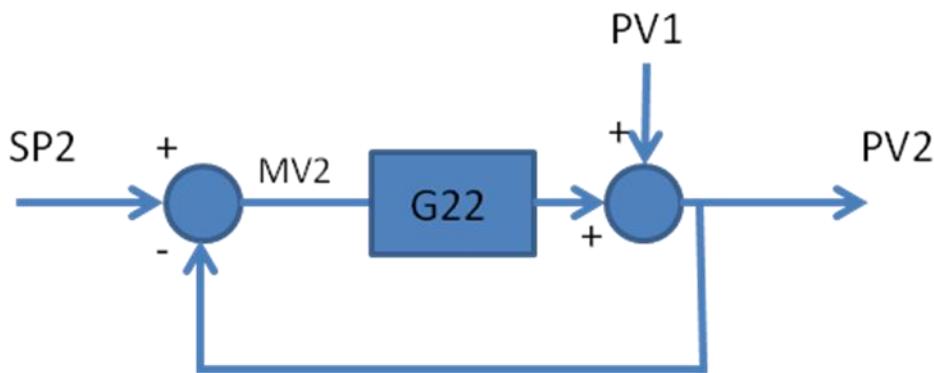


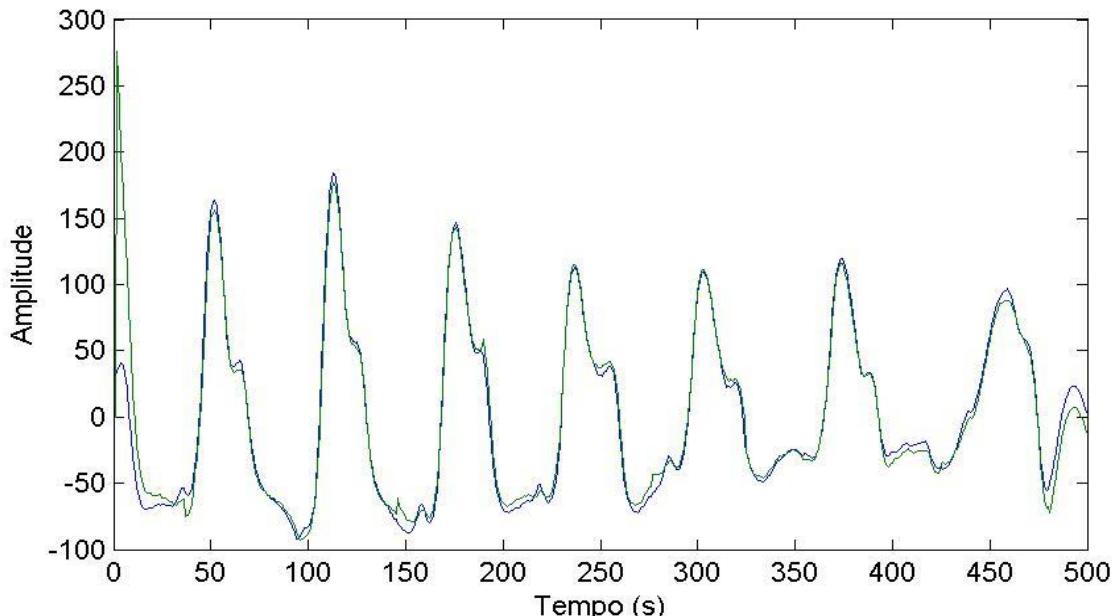
Figura 21 – Malha de controle 2 e as variáveis envolvidas.

Da mesma forma, simulou-se  $PV2$  em função das combinações das variáveis  $MV2$  e  $PV1$ . O menor erro de simulação comparado com a  $PV2$  real foi obtido com o modelo  $PV2$  relacionado com  $MV2$  e  $PV1$  simultaneamente ( $OP=3$ ). Os resultados estão expressos na tabela 3.

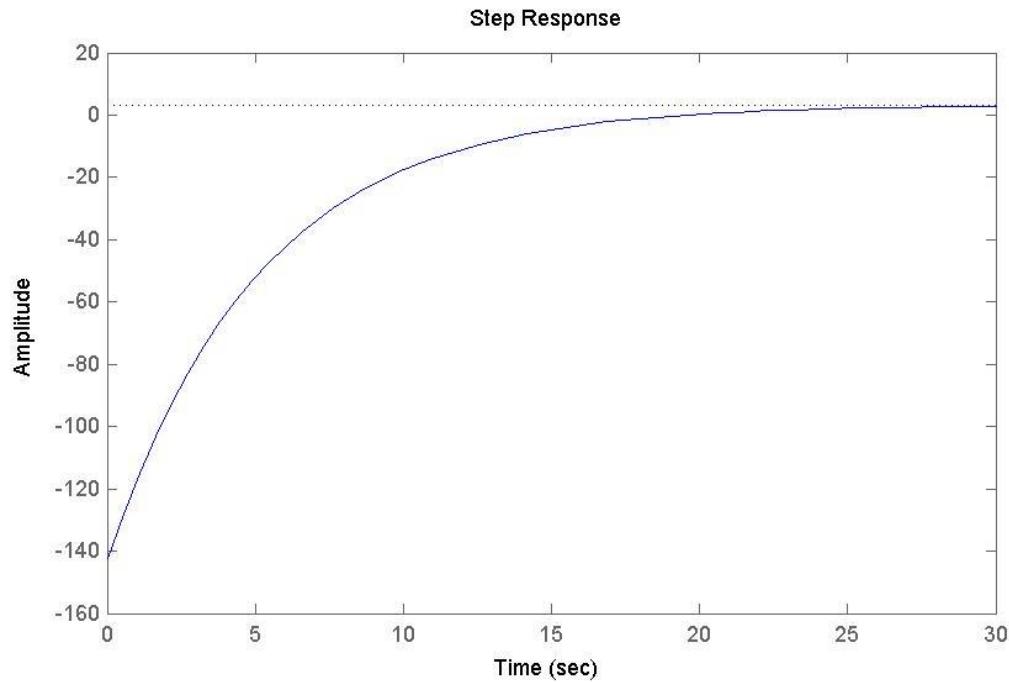
**Tabela 3 – Erro do PV2 simulado comparado com a PV2 real nos diversos modelos.**

OP	Em função de	Loss Function	FPE	FT
1	MV2	11.3117	11.4483	$-168.4 s + 0.8197$ ----- $s + 0.2182$
2	PV1	48.293	48.8761	$199.2 s - 24.94$ ----- $s + 0.03503$
3	MV2 e PV1	6.92076	7.06057	$-143 s + 0.6374$ G12=----- $s + 0.1945$ $73.61 s - 9.951$ G22=----- $s + 0.1945$

Podemos ver o comportamento de PV2 em função de MV2 e PV1 comparada com PV2 real pela figura 22.

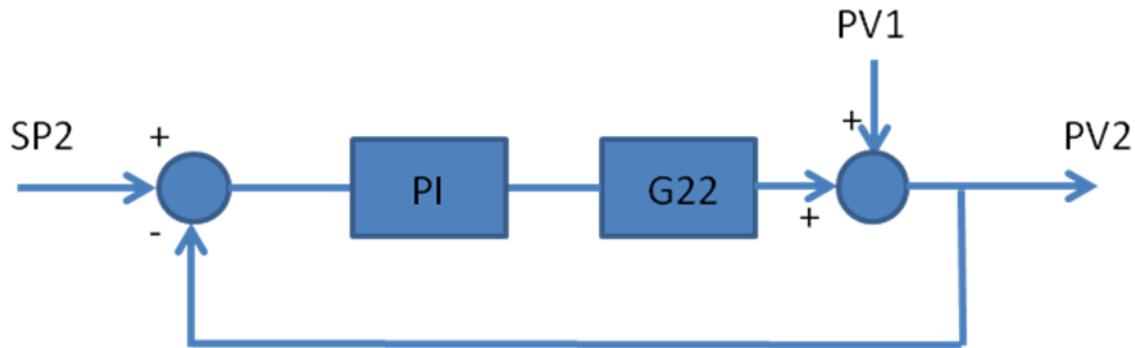
**Figura 22 – PV2 simulada x PV2 real.**

A resposta ao degrau unitário do modelo em malha aberta pode ser vista na figura 23.

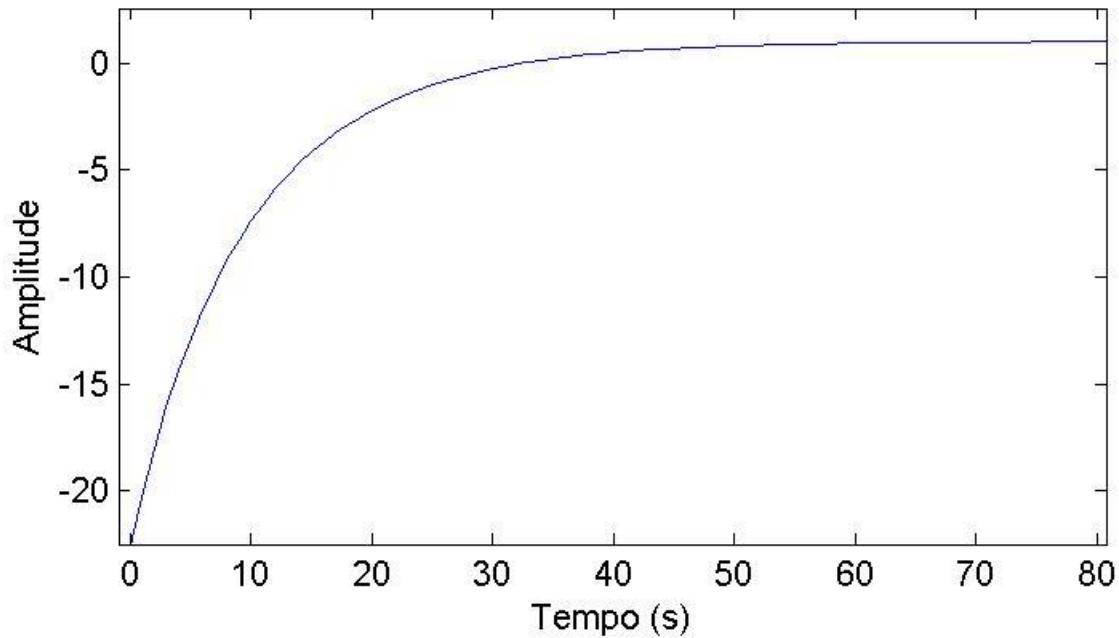


**Figura 23 – Resposta ao degrau unitário em malha aberta.**

Projetou-se para este sistema o controlador PI utilizando-se o método do lugar das raízes. Para  $K_P=0.0067$  e  $K_I=0.0013$ , obtemos a resposta ao degrau mostrada na figura 25. Nesta simulação, o efeito de PV1 não foi considerado.

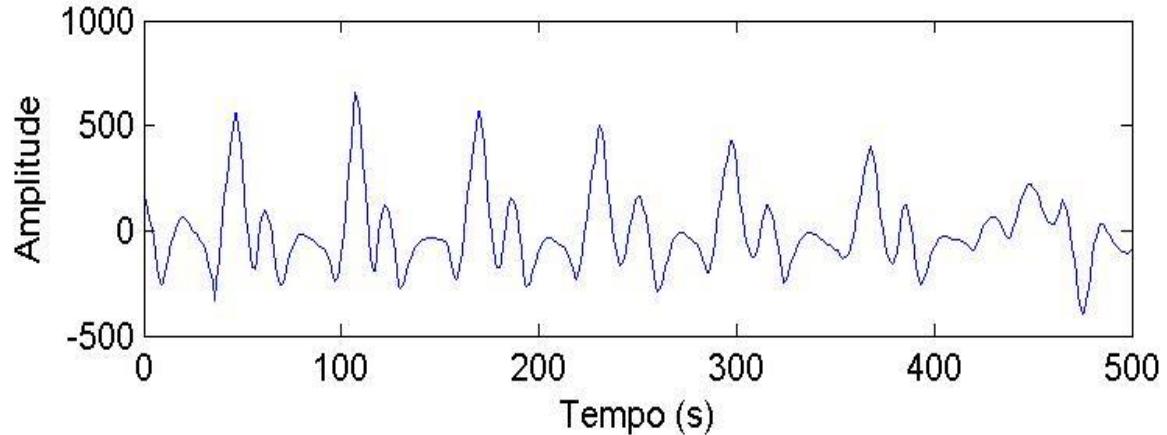


**Figura 24 – Sistema 2 com o controlador PI.**



**Figura 25 – Resposta ao degrau unitário para o controlador PI projetado.**

O efeito da perturbação PV1 é mostrado na figura 26, que resulta em um comportamento oscilatório em PV2.



**Figura 26 – Resposta ao degrau unitário considerando-se a perturbação PV1.**

Para reduzir o efeito de PV1 na saída PV2, foi projetado um compensador *feedforward*, mostrado pela figura 27. O resultado da ação deste compensador pode ser observado na figura 28.

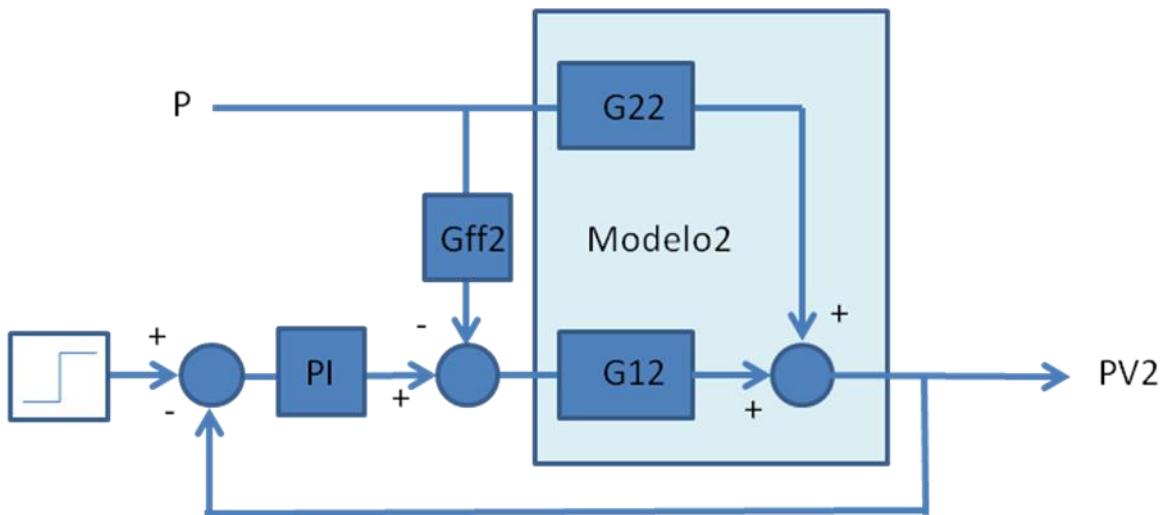


Figura 27 – Representação do Modelo 2 com o compensador *feedforward* (Gff2).

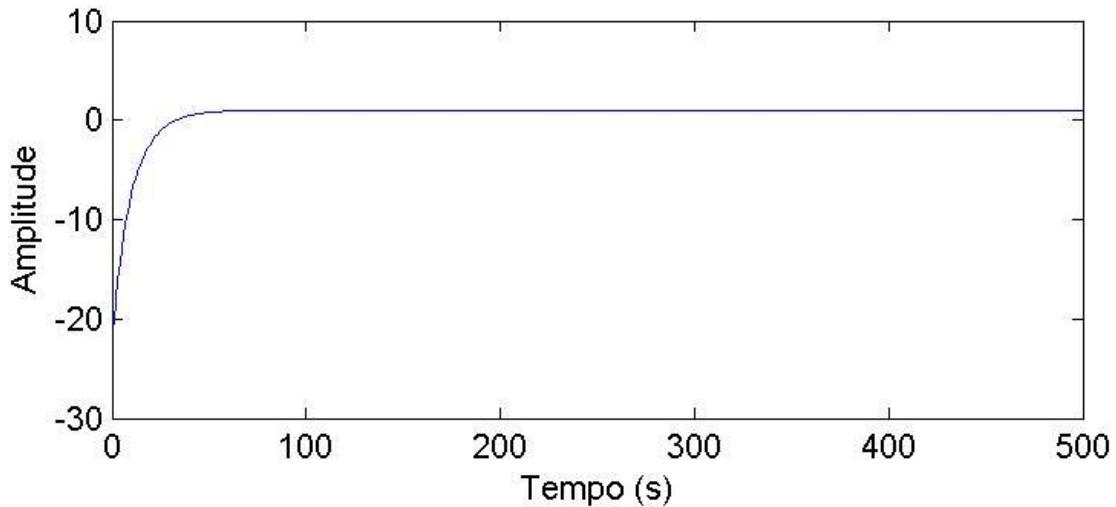


Figura 28 – PV2 simulada com a ação do bloco *feedforward*.

O compensador *feedforward* Gff2 é calculado da seguinte forma:

$$Gff2(s) = -\frac{G21(s)}{G11(s)} = -0.5151$$

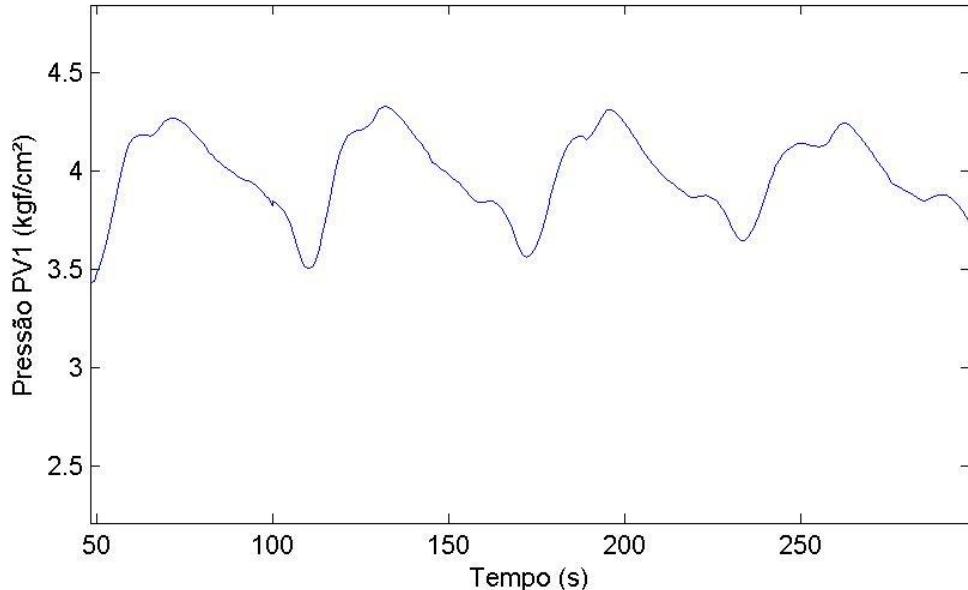
onde

$$G21(s) = \frac{-143 s - 0.6374}{s + 0.1945} \quad (\text{FT do distúrbio})$$

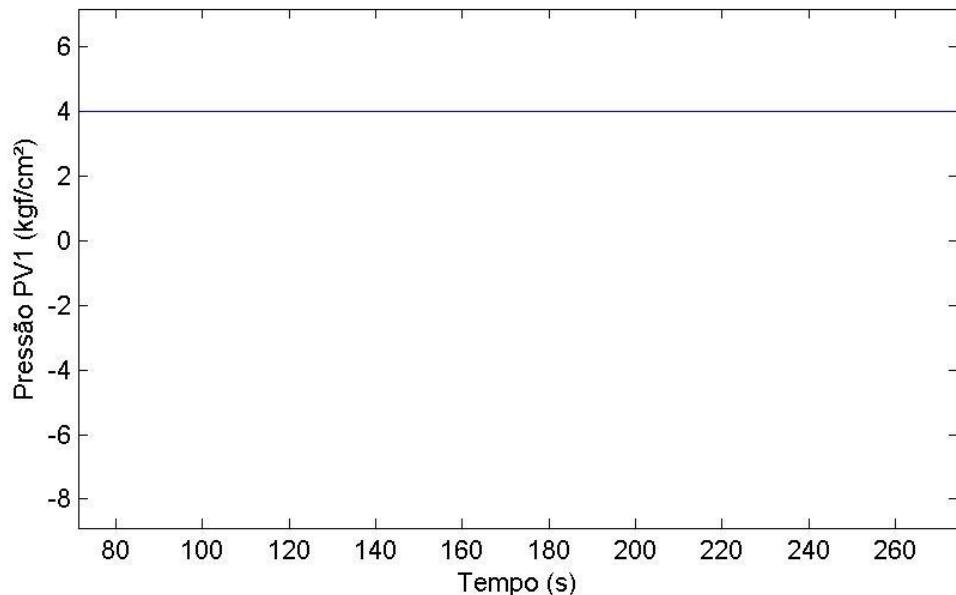
$$G11(s) = \frac{73.61 s - 9.951}{s + 0.1945} \quad (\text{FT do processo})$$

Após verificado o efeito desejado do compensador *feedforward* para a redução dos efeitos das perturbações nos sistemas 1 e 2, simulou-se então os modelos de cada sistema com os dados originais, sem retirar as médias. As figuras 29 e

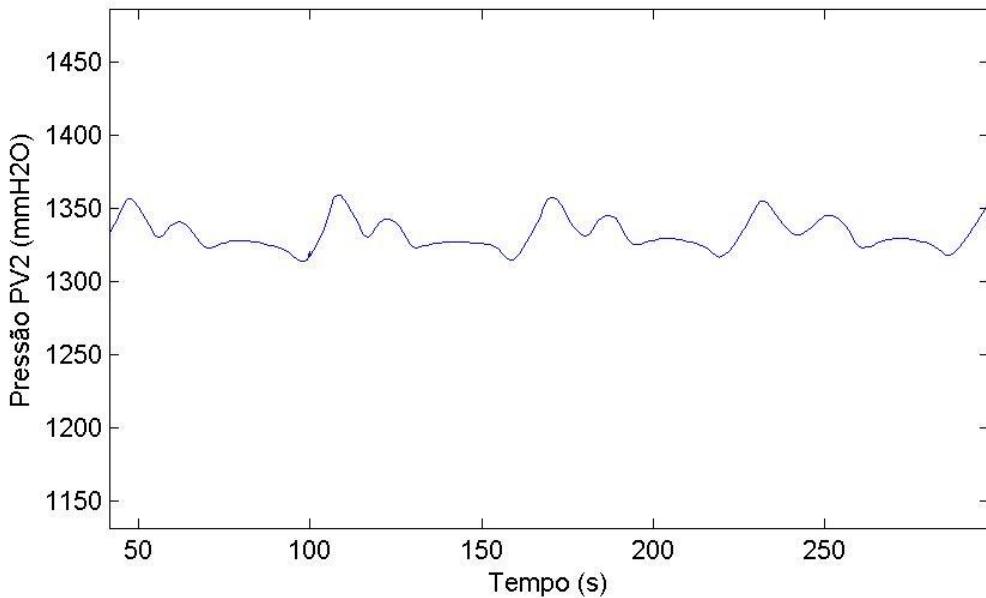
31 representam as saídas PV1 e PV2 sem o compensador *feedforward*, enquanto que as figuras 30 e 32 mostram o efeito da inclusão do compensador nos modelos 1 e 2, respectivamente.



**Figura 29 – Saída PV1 sem a atuação do *feedforward* (setpoint de 4 kgf/cm<sup>2</sup>).**

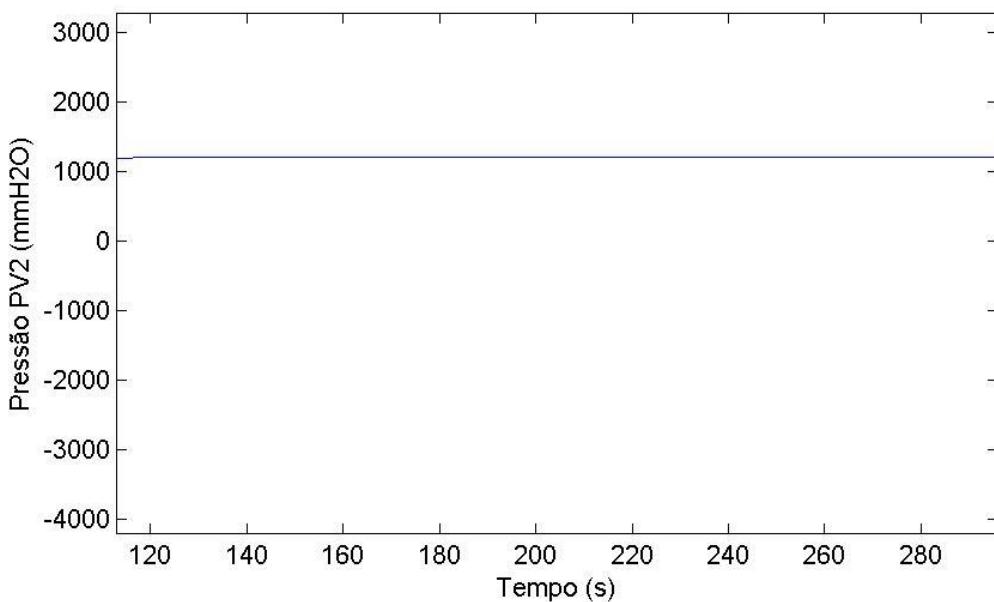


**Figura 30 – Saída PV1 com a atuação do *feedforward* (setpoint de 4 kgf/cm<sup>2</sup>).**



**Figura 31 – Saída PV2 sem a atuação do *feedforward* (setpoint de 1200 mmH2O).**

Agora, pela figura 34, temos a simulação considerando a atuação do *feedforward*, eliminando o efeito da perturbação PV1.



**Figura 32 – Saída PV2 com a atuação do *feedforward* (setpoint de 1200 mmH2O).**

## 6 – Conclusões

Neste trabalho foi analisado o comportamento do sistema de queima do forno da usina de pelotização Nibrasco 6, a fim de se reduzir a oscilação da pressão nas malhas de controle do gás natural. A partir das análises realizadas, podemos diagnosticar os seguintes problemas que impactam na oscilação na pressão de gás natural no sistema de controle:

- a) Provável agarramento nas válvulas de controle dos sistemas 1 e 2 que tende a produzir oscilações na malha de controle que controladores PID têm dificuldade de eliminar;
- b) Pequena variação na abertura das duas válvulas de controle. Isto indica super-dimensionamento de válvula, o que as obriga a trabalhar no início da faixa de abertura, que é uma região não-linear que dificulta o bom desempenho de controladores.
- c) Foram identificados modelos relacionando a entrada de controle e perturbações com a variável de processo, que permitiram o projeto de controladores e compensadores.
- d) A estratégia atual de controle de pressão do gás não é adequada para estabilizar a pressão do gás. As perturbações nos sistemas 1 e 2 são causadas pelas variáveis MV2 e PV1, respectivamente, que estão acopladas às variáveis que se quer controlar. Para contornar este problema, foi utilizado como estratégia o compensador *feedforward* em cada sistema para reduzir o efeito deste acoplamento.
- d) Os testes dos controladores e compensadores foram realizados em ambiente de simulação, por não ter havido tempo hábil para sua implementação no sistema real. A redução do efeito das perturbações não será tão eficiente neste caso, mas certamente produzirá melhorias.

Como solução de curto prazo, é recomendável uma alteração na estratégia de controle da pressão do gás fornecida ao forno da Usina 6. Essa alteração se dá a partir da adição do bloco *feedforward* nos sistemas 1 e 2 para se reduzir o efeitos das perturbações MV2 e PV1.

Com relação ao comportamento das válvulas de controle, é recomendável primeiramente a manutenção das mesmas para se eliminar os atritos identificados. Esta medida ajuda as válvulas a trabalharem de forma mais linear, favorecendo o controle da pressão.

Após a implantação das duas medidas anteriores, segue como sugestão o redimensionamento das duas válvulas. Válvulas trabalhando no início da faixa de abertura indicam super-dimensionamento no coeficiente de vazão. O início da faixa de abertura de uma válvula de controle não é considerado de comportamento linear e, portanto, não é ideal para um bom sistema de controle (o ideal é trabalhar com abertura entre 30 e 70% da faixa). A especificação sugerida para as válvulas do sistema 1 e 2 estão descritas no anexo I.

## 7 - Recomendações

Segue como recomendação a implantação da estratégia de controle definida neste trabalho no sistema de queima da Usina 6. O teste permitirá avaliar a eficiência dos controladores e compensadores projetados para a redução da oscilação de pressão do gás natural. Recomenda-se implantar a mesma estratégia nas demais usinas de pelotização de Tubarão, já que todas elas contemplam o mesmo sistema de controle do gás.

As análises realizadas para se identificar problemas o sistema de controle de gás natural podem ser utilizadas para se diagnosticar gargalos nos sistemas de controle dos queimadores dos fornos de pelotização. Problemas relacionados a atritos e dimensionamento de válvulas de controle, assim como a existência de controladores agressivos podem ser identificados e tradados, buscando então um melhor desempenho dessas malhas de controle.

## REFERÊNCIAS

- Åström, K.J., Hägglund, T., Advanced PID Control, Editora ISA (2005)
- Campos, M. C. M. M, Goncalves, H. C. Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais. Editora: Edgard Blucher (2006)
- Choudhury, M.A.A.S., Jain,M., Shah, S.L., Stiction – definition,modelling, detection and quantification, Journal of Process Control 18, (2008), 232–243.
- Corripio, A. B.. Tuning of industrial control systems, Edição, 2nd, Editora ISA, (2001)
- Forssel, U., Ljung, L. Closed-loop identification revisited. Automatica 35(7), 1215-1241. 1999
- Horch A., A simple method for detection of stiction in control valves, Control (1999)
- Ogata K, Hall, P. Engenharia de Controle Moderno, 2003, 4a Ed.
- RANGEL, L. A. B.; MAGALHÃES, Luiz Soares. Pelotização. Vitória: SENAI, 2000. 196p.

## ANEXO 1 – Folha de dados propostas para o redimensionamento das válvulas de controle dos sistemas 1 e 2

**Tabela 1 – Folha de dados proposta para o redimensionamento da válvula de controle 1.**

<b>FOLHA DE DADOS – VÁLVULA DE CONTROLE 2</b>	
<b>DESCRÍÇÃO</b>	<b>ESPECIFICADO</b>
Tag	OF1362
Quantidade	1 Peça
Função	Controle de Pressão da Entrada de Gás dos Fornos de Pelotização da Usinas 6
Diâmetro / Espessura Linha	Entrada: 8" / 40 Saída: 8" / 40
Modelo	Informar
<b>DADOS CORPO E CASTELO</b>	
Diâmetro Corpo / Orifício	6" / 3,3125 "
Tipo do Corpo	Globo
Classe	150
Material do Corpo	ASME SA-216/SA-216M Gr. WCB
Material do Flange	ASME SA-216/SA-216M Gr. WCB
Conexão	ASME B16.5-FR
Distância Face a Face	ISA S 75.08
Tipo do Castelo	Castelo Normal
Prisioneiro / Porca	ASTM A-193-GR.B7 / ASTM A-194-GR.2H
Material da Gaxeta	Anéis em V de Teflon
<b>DADOS INTERNOS</b>	
Característica	Linear
Obturador	Inox 316
Gaiola / Sede	Inox 410 endurecido
Anel de Vedação	Buna N
Tipo da Guia	Gaiola Baixo Ruído 1 Estágio
Fluxo	Fechar
Classe de Vazão Norma FCI 70-2	IV
<b>DADOS ATUADOR</b>	
Atuador	Diaphragma
Ação Falta de Ar	Fechado
Aperto Inicial da Mola	12 PSIG
Volante	0-Sem Volante
Delta P Fechamento	10,5 Kgf/cm <sup>2</sup>
<b>ACESSÓRIOS</b>	
<b>Posicionador Eletro-Pneumático</b>	
Sinal de Entrada	4 - 20 mA + Protocolo de Comunicação HART
Invólucro	IP65
Alimentação	35 PSIG
Ajuste Local	Sim, com chave magnética
Filtro Regulador	Com Manômetro
<b>Solenóide</b>	
Material	Latão
Diâmetro Nominal	1/4" NPT

Número de Vias	03 vias
Voltagem / Frequência	220 VAC / 60 HZ
Posição Sem Energia	Normalmente Fechada
Invólucro	IP65
Classe da Bobina	H
<b>REQUISITOS ADICIONAIS</b>	
Tubos e Conexões	Aço Inox
Pintura	PPS-002 ( 0 a 120°C )
Plaqueta de Identificação	Aço Inox
<b>OBSERVAÇÕES</b>	
4 - Acabamento dos flanges ranhurado conforme norma MSS SP-6	
5 - Com fole na haste para proteção ao pó	
<b>CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO</b>	
Fluido	Gás Natural
Vazão mínima / normal / máxima	5000 / 10500 / 13500 Nm <sup>3</sup> /h
Pressão entrada mínima / normal / máxima	7,00 / 9,00 / 10,50 Kgf/cm <sup>2</sup>
Pressão saída mínima / máxima	3,00 / 4,00 / 5,00 Kgf/cm <sup>2</sup>
Temperatura mínima / máxima	25 / 40 °C
Densidade relativa mínima / máxima	0,63 / 0,68
Tubulação de entrada / saída da válvula	6"

**Tabela 2 – Folha de dados proposta para o redimensionamento da válvula de controle 2.**

<b>FOLHA DE DADOS – VÁLVULA DE CONTROLE 2</b>	
<b>DESCRÍÇÃO</b>	<b>ESPECIFICADO</b>
Tag	OF1361A / OF1361B
Quantidade	02 Peças
Função	Controle de Pressão do Anel de Gás dos Fornos de Pelotização das Usinas 5 e 6
Diâmetro / Espessura Linha	Entrada: 10 " / 40 Saída: 18" / 40
Modelo	Informar
<b>DADOS CORPO E CASTELO</b>	
Diâmetro Corpo / Orifício	6" / 3,3125 "
Tipo do Corpo	Globo
Classe	150
Material do Corpo	ASME SA-216/SA-216M Gr. WCB
Material do Flange	ASME SA-216/SA-216M Gr. WCB
Conexão	ASME B16.5-FR
Distância Face a Face	ISA S 75.08
Tipo do Castelo	Castelo Normal
Prisioneiro / Porca	ASTM A-193-GR.B7 / ASTM A-194-GR.2H
Material da Gaxeta	Anéis em V de Teflon
<b>DADOS INTERNOS</b>	
Característica	Linear
Obturador	Inox 316
Gaiola / Sede	Inox 410 endurecido
Anel de Vedação	Buna N
Tipo da Guia	Gaiola Baixo Ruído 1 Estágio
Fluxo	Fechar
Classe de Vazão Norma FCI 70-2	IV
<b>DADOS ATUADOR</b>	

Atuador	Diafragma
Ação Falta de Ar	Fechado
Aperto Inicial da Mola	12 PSIG
Volante	0-Sem Volante
Delta P Fechamento	5,0 Kgf/cm <sup>2</sup>
<b>ACESSÓRIOS</b>	
<b>Posicionador Eletro-Pneumático</b>	
Sinal de Entrada	4 - 20 mA + Protocolo de Comunicação HART
Invólucro	IP65
Alimentação	35 PSIG
Ajuste Local	Sim, com chave magnética
Filtro Regulador	Com Manômetro
<b>Solenóide</b>	
Material	Latão
Diâmetro Nominal	1/4" NPT
Número de Vias	03 vias
Voltagem / Frequência	220 VAC / 60 HZ
Posição Sem Energia	Normalmente Fechada
Invólucro	IP65
Classe da Bobina	H
<b>REQUISITOS ADICIONAIS</b>	
Tubos e Conexões	Aço Inox
Pintura	PPS-002 ( 0 a 120°C )
Plaqueta de Identificação	Aço Inox
<b>OBSERVAÇÕES</b>	
4 - Acabamento dos flanges ranhurado conforme norma MSS SP-6	
5 - Com fole na haste para proteção ao pó	
<b>CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO</b>	
Fluido	Gás Natural
Vazão mínima / normal / máxima	5000 / 10500 / 13500 Nm <sup>3</sup> /h
Pressão entrada mínima / normal / máxima	3,00 / 4,00 / 5,00 Kgf/cm <sup>2</sup>
Pressão saída mínima / máxima	1200 / 1500 mmH2O
Temperatura mínima / máxima	25 / 40 °C
Densidade relativa mínima / máxima	0,63 / 0,68
Tubulação de entrada / saída da válvula	6"