

# IMPLEMENTAÇÃO DE SINAL ANTECIPATIVO DE VAZÃO DO GÁS INJETADO (LDG/MG) NA MALHA DE CONTROLE DAS CALDEIRAS DA CTE\*

Claudiney Rosa da Silva de Souza<sup>1</sup>  
Valter Barbosa de Oliveira Junior<sup>2</sup>  
Wagner Traspadini Oliveira<sup>3</sup>

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo descrever o procedimento aplicado para modelagem das variações de poder calorífico inferior (PCI) do BFG (gás de alto forno), devido à injeção de LDG (gás de aciaria), enviado às centrais termelétricas (CTEs) #1, #2, #3 e #4 e apresentar o projeto básico do sistema de controle antecipativo para redução dos distúrbios da pressão das caldeiras nas respectivas CTEs.

**Palavras-chave:** Termelétrica; PCI; Combustão;

## IMPLEMENTATION OF ANTECIPATIVE INJECTED GAS FLOW (LDG / MG) SIGNAL IN CTE BOILERS CONTROL MESH

### Abstract

The objective of this work is to describe the procedure applied to the modeling of the lower calorific value (LCV) variations of the BFG due to the injection of LDG (Linz-Donawitz Gas) sent to power plants # 1, # 2, # 3 and # 4 and present the basic design of the anticipative control system to reduce boiler pressure disturbances in the respective power plants.

**Keywords:** Power; Plant; LCV; Combustion.

<sup>1</sup> Engenharia Controle e Automação, Engenheiro, Técnico de controle de processo, Setor de manutenção da área de produção de energia, ArcelorMittal Brasil S.A., Serra, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Elétrica, UFES, Doutor em Engenharia Elétrica - Área Automação, UFES, Especialista de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Engenharia Elétrica e Eletrônica, ArcelorMittal Brasil S.A., Serra, ES, Brasil.

<sup>3</sup> Formação. Eng Controle e Automação, Engenheiro, Setor de manutenção da área de produção de energia, ArcelorMittal Brasil S.A., Serra, ES, Brasil.

<sup>4</sup> Engenharia Elétrica com ênfase em computação, Engenheiro, Técnico da área de produção de energia, Área de Produção de Energia, ArcelorMittal Brasil S.A., Serra, ES, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A AMT é uma empresa que trabalha na fabricação de aço e pertence ao maior grupo siderúrgico do mundo.

Seu sucesso não é só baseado na fabricação do aço, mas também na utilização de co-produtos dentre eles os gases resultantes do processo. Parte desses gases é utilizado na Central Termelétrica (CTE), com a finalidade de gerar vapor em caldeiras para utilização na produção de energia elétrica através de turbo-geradores. Devido a um aproveitamento de dois tipos de gases LDG e MG (Gás de Aciaria e Gás Misto), sendo eles injetados na linha de BFG (Gás de Alto Forno) pertencente a área da CTE, as unidades sofriam com variações causadas pela mudança brusca do Poder Calorífico Inferior (PCI) do gás BFG misturado, provocando vários distúrbios, com risco de parada da unidade. No desenvolvimento deste trabalho, iremos mostrar a solução implementada para reduzir ao mínimo estas variações.

## 2 SITUAÇÃO INICIAL

O gás de aciaria (LDG) pode ser consumido diretamente na CTE #4, que dispõe de queimadores exclusivos para LDG. Entretanto, o regime de geração de LDG na aciaria ocorre em bateladas. Dessa maneira, como contramedida para evitar acendimentos e apagamentos recorrentes de queimadores de LDG na CTE #4, os volumes excedentes de geração de LDG são injetados na tubulação de BFG que alimenta as CTEs #1, #2, #3 e #4, visando à realização de uma mistura do BFG com o LDG, possibilitando a realização da queima do LDG nas quatro CTEs (veja a Figura 1). Além disso, eventualmente, quando há sobra de gás misto (MG), o volume de gás misto excedente é injetado na rede de LDG para CTEs.

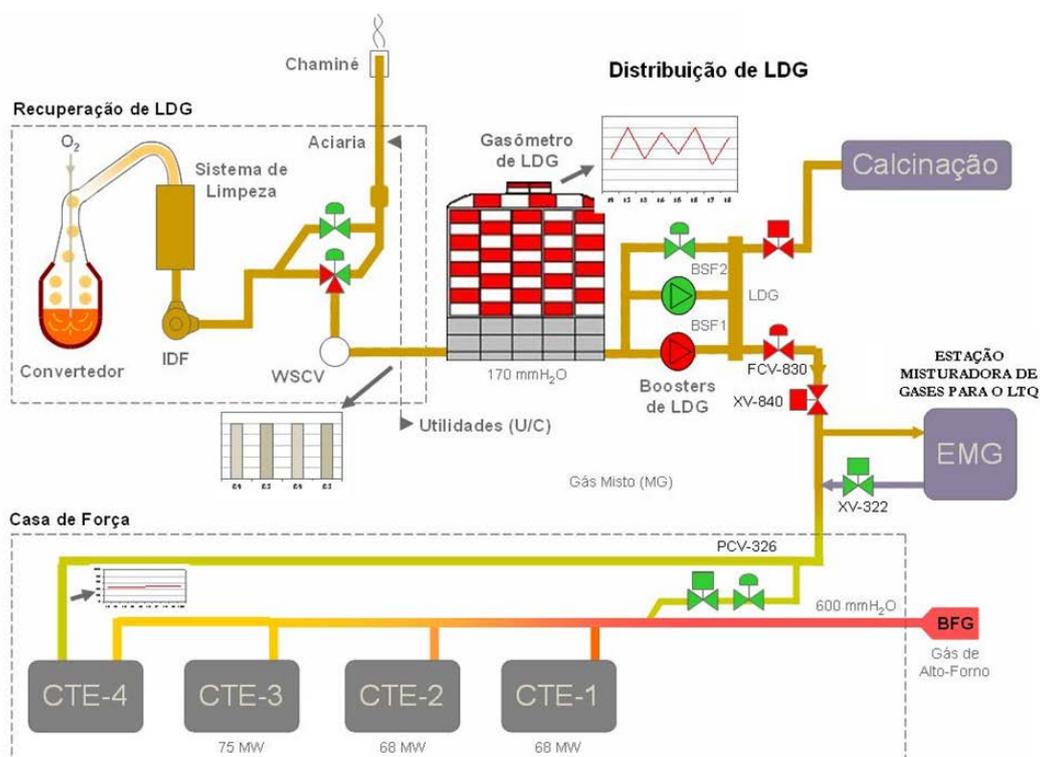


Figura 1 - Distribuição de LDG

O LDG possui PCI de 1500 a 2100 Kcal/Nm<sup>3</sup> e o PCI do MG é controlado em 2600 Kcal/Nm<sup>3</sup>, mas o PCI do BFG possui valor em torno de 830 Kcal/Nm<sup>3</sup>. Por isso, considerando as proporções admitidas para mistura do LDG (ou MG) com o BFG, esta mistura provoca um aumento no PCI do BFG, que pode chegar a no BFG consumido nas caldeiras das CTEs. Como os sistemas de controle das caldeiras não compensavam variações de PCI do BFG, frequentemente eram observadas ocorrências de variações de pressão da caldeira devido a variações de vazão de LDG (ou MG) no BFG.

### 3 MODELAGEM DO DISTÚRPIO

As etapas do procedimento de modelagem adotado foram praticamente idênticas para todas as CTEs, com a única exceção de que, para a CTE #4, é considerada a vazão medida de LDG para a caldeira. As etapas são descritas a seguir.

#### 3.1 Coleta de dados

Os dados utilizados para o procedimento de identificação foram coletados do PIMS (AspenProcess Explorer) em diferentes experimentos. Cada experimento consiste em um conjunto de dados, amostrados a cada dois segundos, das seguintes variáveis:

- Abertura da válvula de injeção de LDG ao BFG (PIC-326-MV) [%];
- Vazão de BFG para a caldeira [Ndam<sup>3</sup>/h];
- Vazão de COG para a caldeira [Ndam<sup>3</sup>/h];
- Vazão de LDG para a caldeira (exclusivamente para a CTE #4) [Ndam<sup>3</sup>/h];
- Vazão de alcatrão para a caldeira [t/h];
- Vazão de vapor produzido pela caldeira [t/h];
- Vazão total de BFG para todas as caldeiras [Ndam<sup>3</sup>/h];

Os dados coletados estão compreendidos entre os dias 04 de abril de 2013 e 02 de agosto de 2014 e cada experimento possui entre 2h e 6h de duração.

Diversas premissas foram adotadas durante a coleta dos dados, de forma a aumentar o ajuste dos modelos aos dados reais medidos. Procuraram-se períodos em que houvesse grande número de manobras da válvula PCV-326, porém evitando-se aberturas superiores a 70%, dada a não-linearidade do comportamento da vazão em relação à abertura da válvula nesta faixa. Em todos os experimentos o BFG operou como o Master Fuel, de forma a identificar-se sempre o efeito da injeção de LDG ao Master Fuel. Sempre que possível, as vazões de COG, LDG, alcatrão e vapor foram tomadas de forma a apresentarem o comportamento de degraus, evitando-se ondas senoidais ou rampas, por exemplo. A vazão total de BFG para todas as caldeiras não é utilizada diretamente na identificação dos modelos, mas é uma importante referência para a determinação dos ajustes do modelo adaptativo.

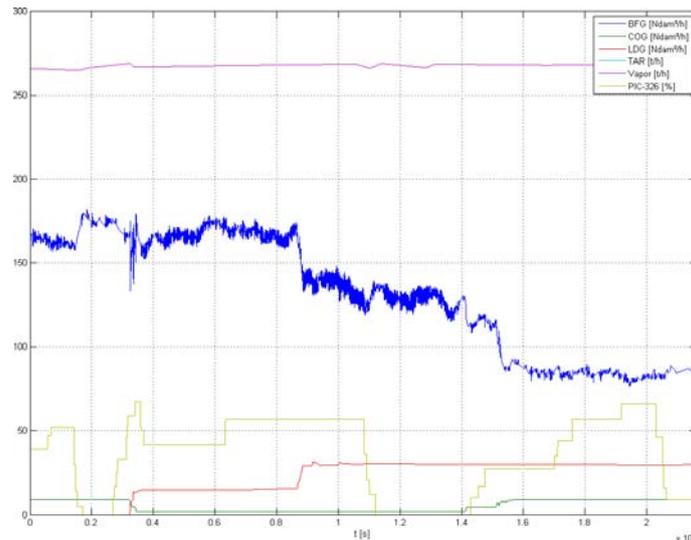


Figura 2 - Exemplo de dados coletados em um experimento (CTE #4 - 04 de abril de 2013)

### 3.2 Identificação de modelos para cada experimento

Adotou-se a premissa de se elaborarem modelos simples e com poucos parâmetros, de maneira a viabilizar a implantação do controlador utilizando apenas o hardware já em operação. Desta forma, todos os modelos utilizados possuem a seguinte estrutura:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{\tau s + 1}$$

A saída do sistema é a variável vazão de BFG para a caldeira [Ndam<sup>3</sup>/h]. São consideradas entradas as seguintes variáveis: abertura da válvula de injeção de LDG ao BFG (PIC-326-MV) [%]; vazão de COG para a caldeira [Ndam<sup>3</sup>/h]; vazão de LDG para a caldeira (exclusivamente para a CTE #4) [Ndam<sup>3</sup>/h]; vazão de alcatrão para a caldeira [t/h]; e vazão de vapor produzido pela caldeira [t/h]. Foi removida a média de todos os dados, de tal forma a identificar o modelo em torno dos pontos de operação de cada experimento.

Utilizou-se a função procest do Matlab para estimação dos parâmetros dos modelos de função de transferência para cada experimento. Utilizaram-se as configurações default da função procest (ver procestOptions no Matlab) para identificação dos modelos.

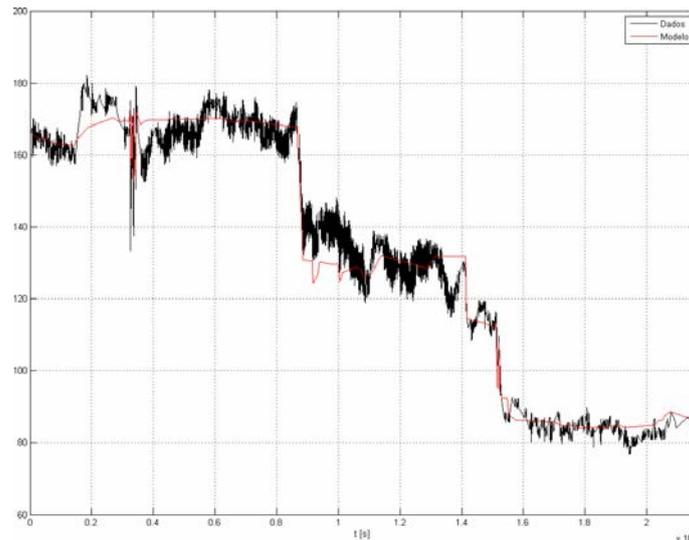


Figura 3 – Exemplo de modelo identificado em um experimento (CTE#4 - 04 de abril de 2013)

O modelo gerado para o exemplo acima foi:

$$\frac{\text{BFG}(s)}{\text{PIC326}(s)} = \frac{-0,059832}{53,429s + 1}$$

$$\frac{\text{BFG}(s)}{\text{COG}(s)} = -6,3075$$

$$\frac{\text{BFG}(s)}{\text{Vapor}(s)} = 1,487$$

$$\frac{\text{BFG}(s)}{\text{LDG}(s)} = -2,787$$

$$\text{FIT} = 85,26\%$$

### 3.3 Rejeição de modelos com baixo FIT (percentual de ajuste aos dados reais)

Dentre os experimentos analisados, surgiram alguns conjuntos de dados com maior incidência de ruídos, o que gerou modelos de baixa qualidade. Os parâmetros estimados por esses experimentos são menos confiáveis e foram rejeitados para a elaboração do modelo global.

Arbitrou-se eliminar qualquer experimento cujo FIT fosse menor que 40%.

### 3.4 Aproximação por um modelo de primeira ordem adaptativo

Após a estimação dos parâmetros dos experimentos individualmente, torna-se necessária a criação de um único modelo para cada CTE. Como se deseja antecipar o distúrbio gerado pela injeção de LDG ao BFG, modelou-se apenas o comportamento dos parâmetros da função de transferência cuja entrada é o MV da malha PIC-326.

Para a criação de um modelo adaptativo, analisou-se como variam os parâmetros dessa função de transferência, em função do ponto de operação. O ponto de operação é dado por duas variáveis, a vazão de vapor produzido na caldeira e o consumo percentual de BFG da caldeira analisada em relação ao consumo total da casa de força.

A técnica utilizada para a determinação do modelo do distúrbio foi a Análise de Componentes Principais (do inglês, PCA). Esta técnica permite gerar o hiper-plano que melhor represente um conjunto de pontos tais que as coordenadas de cada ponto representem um experimento. Desta forma, cada experimento gera um

ponto  $(V_V, T_{BFG}, k)$ , em que  $V_V$  é a vazão média de vapor no experimento,  $T_{BFG}$  é relação entre a vazão média de BFG para a caldeira e a vazão média para todas as caldeiras, e  $K$  é o ganho direto do modelo gerado no experimento. A nuvem de pontos formada por todos os experimentos de uma determinada CTE é então aproximada por um plano. Logo, dada a vazão atual de vapor e taxa de consumo de BFG, é possível estimar o parâmetro  $K$  da função de transferência do distúrbio. Não se encontrou uma tendência bem definida para a constante de tempo ( $\tau$ ) e esta foi considerada constante em toda a faixa de operação.

O procedimento PCA consiste em reunir todos os pontos dos experimentos em uma matriz, de tal forma que cada linha represente um experimento e cada coluna represente uma variável:

$$X = \begin{bmatrix} V_{V1} & T_{BFG1} & k_1 \\ V_{V2} & T_{BFG2} & k_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{Vn} & T_{BFGn} & k_n \end{bmatrix}_{n \times 3}$$

Em que  $V_{Vi}$  representa a vazão de vapor no experimento  $i$ ,  $T_{BFGi}$  representa a taxa de BFG no experimento  $i$  e  $k_i$  representa o ganho do modelo no experimento  $i$ . A seguir, devem-se retirar as médias dos dados, subtraindo de cada elemento a média de sua variável, i.e., de cada dado de vapor subtrai-se a média do vapor, de cada dado de BFG extrai-se a média do BFG e de cada  $k$  subtrai-se a média dos diferentes  $k$ .

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} V_{V1} - \bar{V}_V & T_{BFG1} - \bar{T}_{BFG} & k_1 - \bar{k} \\ V_{V2} - \bar{V}_V & T_{BFG2} - \bar{T}_{BFG} & k_2 - \bar{k} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{Vn} - \bar{V}_V & T_{BFGn} - \bar{T}_{BFG} & k_n - \bar{k} \end{bmatrix}_{n \times 3}$$

A matriz  $\bar{X}^T \bar{X}$  representa as covariâncias entre as três variáveis:

$$\bar{X}^T \bar{X} = \begin{bmatrix} \text{cov}(V_V, V_V) & \text{cov}(V_V, T_{BFG}) & \text{cov}(V_V, k) \\ \text{cov}(T_{BFG}, V_V) & \text{cov}(T_{BFG}, T_{BFG}) & \text{cov}(T_{BFG}, k) \\ \text{cov}(k, V_V) & \text{cov}(k, T_{BFG}) & \text{cov}(k, k) \end{bmatrix}$$

Calculam-se então os autovetores e autovalores da matriz  $\bar{X}^T \bar{X}$ . O autovetor correspondente ao maior autovalor representa a direção em que os dados possuem maior variância; o autovetor correspondente ao segundo maior autovalor representa a direção ortogonal ao primeiro autovetor em que os dados possuem maior variância; o último autovetor representa a direção em que os dados possuem menor variância.

Deseja-se encontrar uma equação que relaciona as três variáveis, o que pode ser traduzido em encontrar a seguinte relação linear:

$$k = c_1 V_V + c_2 T_{BFG} + c_3$$

Portanto, basta utilizar a direção com menor variância entre os dados como sendo normal ao plano gerado pela equação acima.

Resumidamente, procuramos o plano com equação:

$$x_0(V_V - \bar{V}_V) + y_0(T_{BFG} - \bar{T}_{BFG}) + z_0(k - \bar{k}) = 0$$

Tal que  $(x_0, y_0, z_0)$  é o autovetor correspondente ao menor autovalor da matriz  $\bar{X}^T \bar{X}$

## 4 RESULTADOS DA MODELAGEM

### 4.1 CTE #1

Foram realizados trinta e cinco experimentos com a CTE #1 entre os dias 11 de fevereiro de 2014 e 02 de agosto de 2014, dos quais, cinco foram rejeitados pelo baixo FIT. Os experimentos aceitos retornaram os seguintes dados (note que a matriz  $X$  é formada pelas colunas Vapor, Taxa BFG e  $k$ ):

**Tabela 1** - Dados dos experimentos da CTE #1

Experimento	Vapor [t/h]	Taxa BFG [%]	k [%/(Ndam <sup>3</sup> /h)]	FIT [%]
1	185.505	32.664	-0.169	81.1
2	172.268	26.742	-0.151	74.7
3	179.954	25.796	-0.070	72.5
4	175.504	28.864	-0.119	81.7
5	258.849	35.806	-0.160	85.4
6	256.743	32.169	-0.150	68.7
7	224.494	33.967	-0.162	71.3
8	250.543	32.233	-0.122	46.1
9	248.292	26.577	-0.124	68.3
10	267.857	27.462	-0.056	59.6
11	266.446	27.965	-0.122	50.9
12	173.003	26.589	-0.152	42.4
13	170.358	23.176	-0.071	82.3
14	177.031	36.301	-0.042	70.3
15	191.504	25.323	-0.115	73.6
16	169.959	24.336	-0.122	80.1
17	175.726	26.191	-0.178	56.4
18	186.672	34.071	-0.111	73.2
19	204.923	26.899	-0.172	82.6
20	209.512	28.394	-0.113	86.1
21	203.679	30.511	-0.096	78.7
22	206.261	31.515	-0.076	59.6
23	203.025	36.476	-0.185	74.4
24	208.650	33.654	-0.113	71.2
25	255.522	39.073	-0.196	66.9
26	260.867	38.043	-0.138	64.3
27	265.920	36.886	-0.182	71.8
28	261.945	37.238	-0.242	56.9
29	261.654	33.099	-0.169	82.6
30	267.217	32.124	-0.125	66.7
Mínimo	169.959	23.176	-0.242	42.4
Média	217.996	31.005	-0.133	70.0
Máximo	267.857	39.073	-0.042	86.1

A equação do ganho  $k$  é:

$$k = -0,1334 - 0,00015607(V_V - 218,0) - 0,003378(T_{BFG} - 31,0)$$

$$k = 0,0053 - 0,00015607V_V - 0,003378T_{BFG}$$

A constante de tempo é  $\tau = 53s$

A função de transferência do distúrbio para a CTE #1 é:

$$\frac{BFG(s)}{PIC326(s)} = \frac{0,0053 - 0,00015607V_V - 0,003378T_{BFG}}{53s + 1}$$

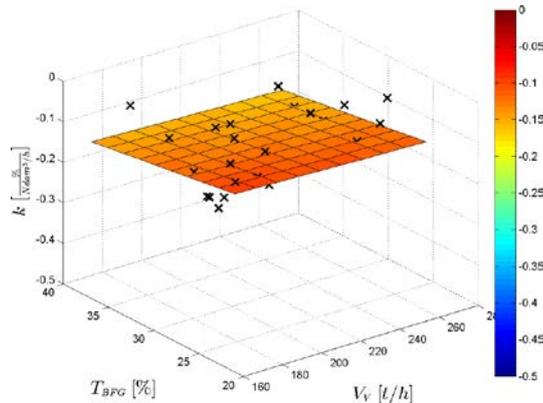


Figura 4 - Modelo do ganho k para a CTE #1

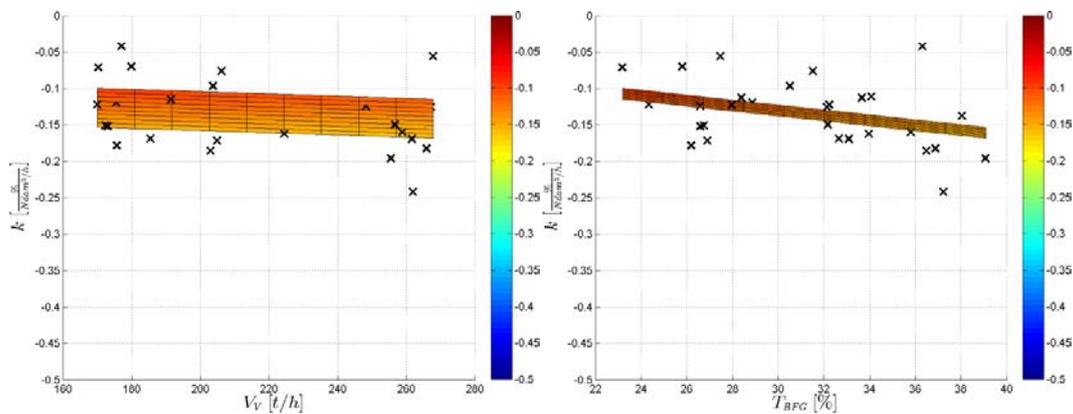


Figura 5 - Modelo do ganho k para a CTE #1 (vistas parciais)

## 4.2 CTE #2

Foram realizados dezoito experimentos com a CTE #2 entre os dias 15 de janeiro de 2014 e 10 de maio de 2014. Os seguintes dados foram retornados:

Tabela 2 - Dados dos experimentos da CTE #2

Experimento	Vapor [t/h]	Taxa BFG [%]	k [%/(Ndam³/h)]	FIT [%]
1	199.140	30.927	-0.294	62.0
2	205.614	30.923	-0.221	57.6
3	192.646	25.229	-0.105	75.1
4	258.590	32.052	-0.281	75.9
5	230.740	35.887	-0.257	69.9
6	220.916	38.918	-0.308	62.9
7	203.503	29.465	-0.200	78.8
8	208.212	40.536	-0.327	73.6
9	201.084	33.853	-0.245	72.7
10	199.441	32.232	-0.282	62.1
11	190.615	34.248	-0.295	74.1
12	202.788	36.393	-0.484	68.3
13	249.556	47.211	-0.213	82.9
14	245.745	54.172	-0.374	62.9
15	230.450	36.081	-0.163	54.6
16	258.343	37.190	-0.175	82.9
17	258.920	33.564	-0.233	81.9
18	256.938	34.055	-0.215	73.9
Mínimo	190.615	25.229	-0.484	54.6
Média	222.958	35.719	-0.259	70.7
Máximo	258.920	54.172	-0.105	82.9

A equação do ganho k é:

$$k = -0,259 + 0,0013161(V_V - 223,0) - 0,007596(T_{BFG} - 35,7)$$

$$k = -0,2813 + 0,0013161V_V - 0,007596T_{BFG}$$

A constante de tempo é  $\tau = 66s$

A função de transferência do distúrbio para a CTE #2 é:

$$\frac{BFG(s)}{PIC326(s)} = \frac{0,0053 - 0,00015607V_V - 0,003378T_{BFG}}{66s + 1}$$

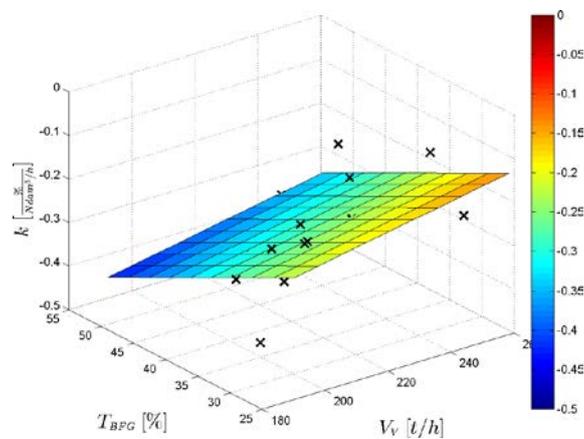


Figura 6 - Modelo do ganho k para a CTE #2

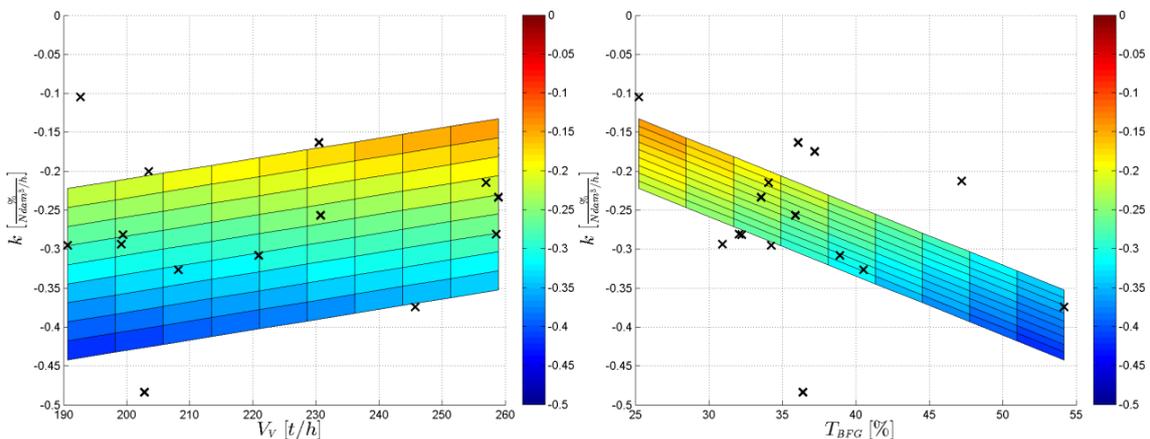


Figura 7 - Modelo do ganho k para a CTE #2 (vistas parciais)

### 4.3 CTE #3

Foram realizados vinte e nove experimentos com a CTE #3 entre os dias 04 de abril de 2013 e 24 de julho de 2014, dos quais, quatro foram rejeitados pelo baixo FIT. Os experimentos aceitos retornaram os seguintes dados:

**Tabela 3 - Dados dos experimentos da CTE #3**

Experimento	Vapor [t/h]	Taxa BFG [%]	k [%/(Ndam³/h)]	FIT [%]
1	196.749	29.904	-0.152	78.3
2	202.130	30.584	-0.181	43.0
3	264.421	31.302	-0.258	79.7
4	194.415	26.187	-0.298	71.0
5	263.761	33.100	-0.178	67.7
6	264.306	32.748	-0.210	68.1
7	264.402	34.637	-0.197	71.4
8	156.203	22.639	-0.055	84.7
9	133.056	26.041	-0.135	76.6
10	123.438	20.393	-0.106	71.7
11	258.766	34.600	-0.173	67.7
12	134.159	16.720	-0.113	50.9
13	218.268	33.353	-0.000	63.9
14	209.413	36.448	-0.199	78.5
15	226.611	35.385	-0.242	82.9
16	222.972	25.253	-0.155	62.7
17	187.865	30.077	-0.155	56.5
18	231.397	32.973	-0.194	74.6
19	226.461	30.497	-0.047	69.1
20	212.351	28.190	-0.044	49.5
21	210.676	33.051	-0.000	78.4
22	264.083	35.221	-0.139	81.6
23	247.046	35.664	-0.237	65.9
24	264.664	34.556	-0.038	56.4
25	255.915	30.241	-0.015	45.8
Mínimo	123.438	16.720	-0.298	43.0
Média	217.341	30.391	-0.141	67.9
Máximo	264.664	36.448	0.000	84.7

A equação do ganho k é:

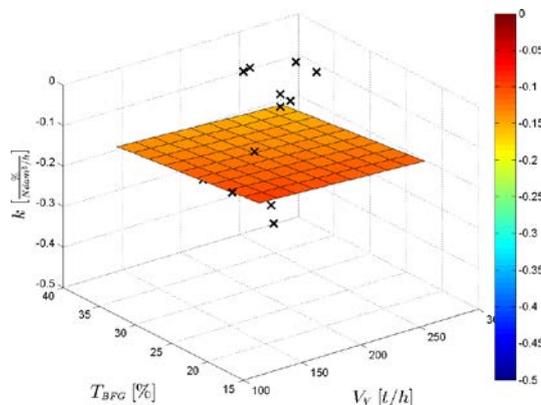
$$k = -0,141 - 0,00014594(V_V - 217,3) - 0,00211(T_{BFG} - 30,4)$$

$$k = -0,0451 - 0,00014594V_V - 0,00211T_{BFG}$$

A constante de tempo é  $\tau \approx 0s$ .

A função de transferência do distúrbio para a CTE #3 é:

$$\frac{BFG(s)}{PIC326(s)} = \frac{-0,0451 - 0,00014594V_V - 0,00211T_{BFG}}{0s + 1}$$



**Figura 8 - Modelo do ganho k para a CTE #3**

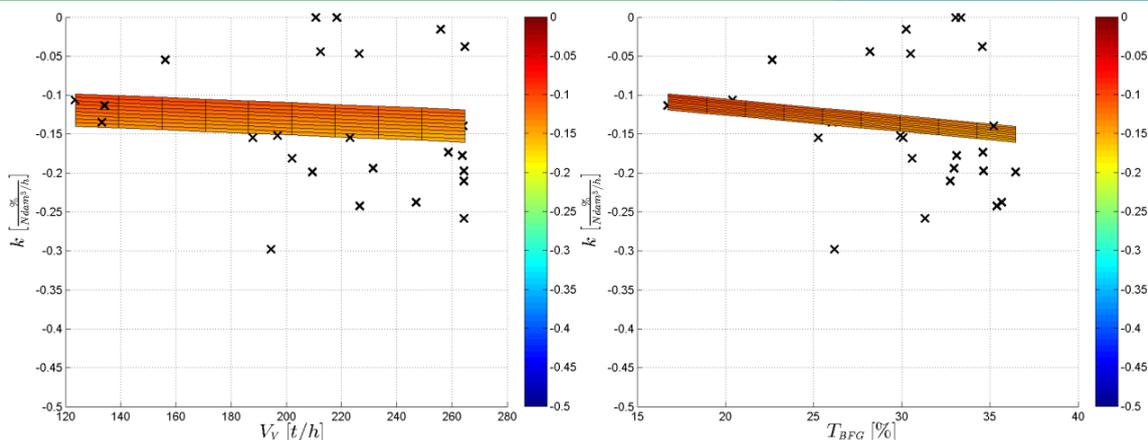


Figura 9 - Modelo do ganho k para a CTE #3 (vistas parciais)

#### 4.4 CTE #4

Foram realizados vinte e nove experimentos com a CTE #4 entre os dias 04 de abril de 2013 e 06 de maio de 2014, dos quais, dois foram rejeitados pelo baixo FIT. Os experimentos aceitos retornaram os seguintes dados:

Tabela 4 - Dados dos experimentos da CTE #4

Experimento	Vapor [t/h]	Taxa BFG [%]	k [%/(Ndam <sup>3</sup> /h)]	FIT [%]
1	126.716	20.335	-0.170	75.0
2	148.514	26.341	-0.200	81.7
3	118.371	20.581	-0.208	54.5
4	188.936	26.267	-0.233	62.0
5	180.236	29.050	-0.243	68.4
6	176.364	34.686	-0.222	52.9
7	209.660	27.940	-0.170	79.9
8	266.951	37.752	-0.315	65.5
9	266.099	35.748	-0.223	76.2
10	241.925	35.988	-0.198	77.2
11	266.460	30.484	-0.092	83.4
12	119.837	16.384	-0.106	79.1
13	144.329	26.857	-0.320	68.1
14	136.921	25.977	-0.238	64.2
15	121.636	22.232	-0.175	82.1
16	117.188	22.694	-0.180	80.0
17	117.776	18.238	-0.180	74.3
18	228.553	35.036	-0.210	72.9
19	214.393	24.564	-0.125	40.2
20	197.729	20.919	-0.104	72.2
21	230.458	30.614	-0.193	51.5
22	267.661	33.229	-0.060	85.3
23	263.704	37.265	-0.479	48.1
24	266.896	34.951	-0.137	79.7
25	267.764	32.448	-0.219	70.9
26	265.284	36.426	-0.104	53.5
27	266.617	26.987	-0.140	68.7
Mínimo	117.188	16.384	-0.479	40.2
Média	200.629	28.518	-0.194	69.2
Máximo	267.764	37.752	-0.060	85.3

A equação do ganho k é:

$$k = -0,194 + 0,0010876(V_V - 200,6) - 0,01253(T_{BFG} - 28,5)$$

$$k = -0,0551 + 0,0010876V_V - 0,01253T_{BFG}$$

A constante de tempo é  $\tau = 88s$

A função de transferência do distúrbio para a CTE #4 é:

$$\frac{BFG(s)}{PIC326(s)} = \frac{-0,0551 + 0,0010876V_V - 0,01253T_{BFG}}{88s + 1}$$

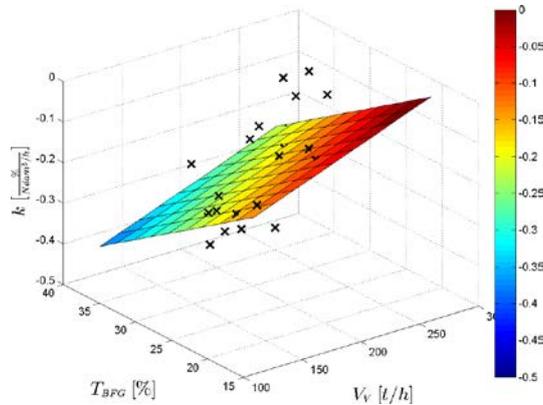


Figura 10 - Modelo do ganho k para a CTE #4

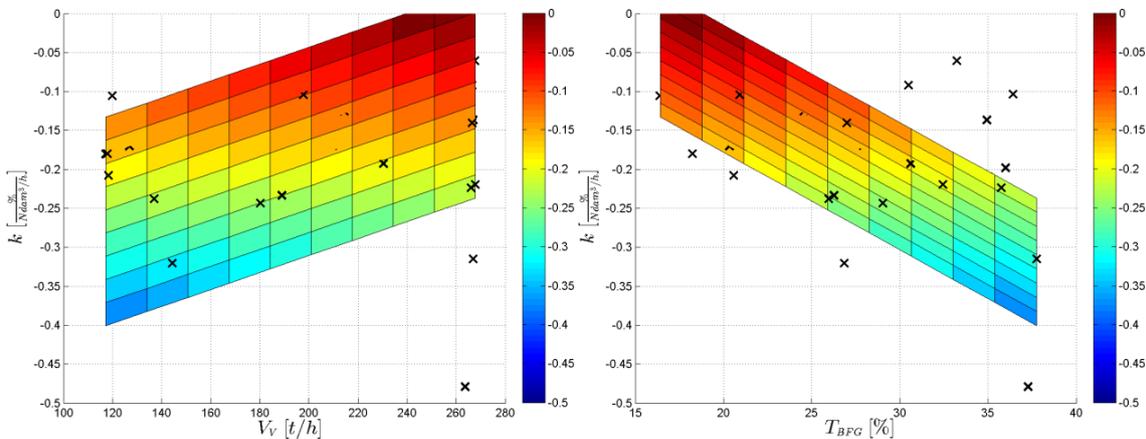


Figura 11 - Modelo do ganho k para a CTE #4 (vistas parciais)

#### 4.5 Resumo dos resultados da modelagem

Foram modelados os comportamentos dos distúrbios causados pela injeção de LDG à rede de BFG sobre a vazão de BFG em cada uma das quatro CTEs. Os resultados estão resumidos no quadro abaixo:

Quadro 1 - Modelos do distúrbio (vazão)

CTE	Modelo
CTE #1	$\frac{BFG(s)}{PIC326(s)} = \frac{0,0053 - 0,00015607V_V - 0,003378T_{BFG}}{53s + 1}$
CTE #2	$\frac{BFG(s)}{PIC326(s)} = \frac{-0,0053 + 0,00015607V_V - 0,003378T_{BFG}}{66s + 1}$
CTE #3	$\frac{BFG(s)}{PIC326(s)} = \frac{-0,0451 - 0,00014594V_V - 0,00211T_{BFG}}{0s + 1}$
CTE #4	$\frac{BFG(s)}{PIC326(s)} = \frac{-0,0551 + 0,0010876V_V - 0,01253T_{BFG}}{88s + 1}$

Nota:  $BFG(s)$  em  $[Ndam^3/h]$ ;  $PIC326(s)$  em  $[\%]$ ;  $V_V$  em  $[t/h]$ ;  $T_{BFG}$  em  $[\%]$ .

Os modelos acima podem ser convertidos para um distúrbio sobre a caloria total injetada em cada caldeira, de forma a estender a aplicação do modelo mesmo quando outros combustíveis estejam como Master Fuel.

**Quadro 2 - Modelos do distúrbio (caloria)**

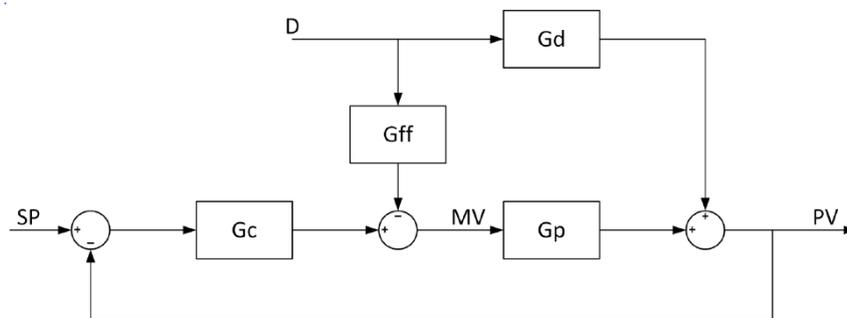
CTE	Modelo
CTE #1	$\frac{\dot{Q}(s)}{PIC326(s)} = \frac{0,0065 - 0,0001969V_V - 0,004140T_{BFG}}{53s + 1}$
CTE #2	$\frac{\dot{Q}(s)}{PIC326(s)} = \frac{-0,3447 + 0,001594V_V - 0,009314T_{BFG}}{66s + 1}$
CTE #3	$\frac{\dot{Q}(s)}{PIC326(s)} = \frac{-0,0552 - 0,0001788V_V - 0,002580T_{BFG}}{0s + 1}$
CTE #4	$\frac{\dot{Q}(s)}{PIC326(s)} = \frac{-0,0675 + 0,001332V_V - 0,01536T_{BFG}}{88s + 1}$

Nota:  $\dot{Q}(s)$  em [Gcal/h];  $PIC326(s)$  em [%];  $V_V$  em [t/h];  $T_{BFG}$  em [%].  $PCI_{BFG} = 816 \text{ kcal/Nm}^3$

A partir dos modelos expostos acima, pode-se dar início ao projeto do controlador antecipativo visando à redução da perturbação no controle de pressão das caldeiras devido à injeção de LDG (ou MG) na rede de BFG.

## 5 PROJETO DOS CONTROLADORES

A estrutura geral utilizada para o projeto dos controladores antecipativos é a apresentada na Figura 12.



**Figura 12 - Estrutura do controlador antecipativo**

Em que  $G_p$  é a função de transferência do processo;  $G_c$  é a função de transferência do controlador realimentado (feedback);  $G_d$  é a função de transferência do distúrbio; e  $G_{ff}$  é a função de transferência do controlador antecipativo (feedforward). A seguir os resultados encontrados para cada CTE.

### 5.1 CTE #1

O sistema de controle atual da CTE #1 é dado pela Figura 13. Destacado em vermelho, encontra-se o controlador antecipativo proposto por este trabalho.

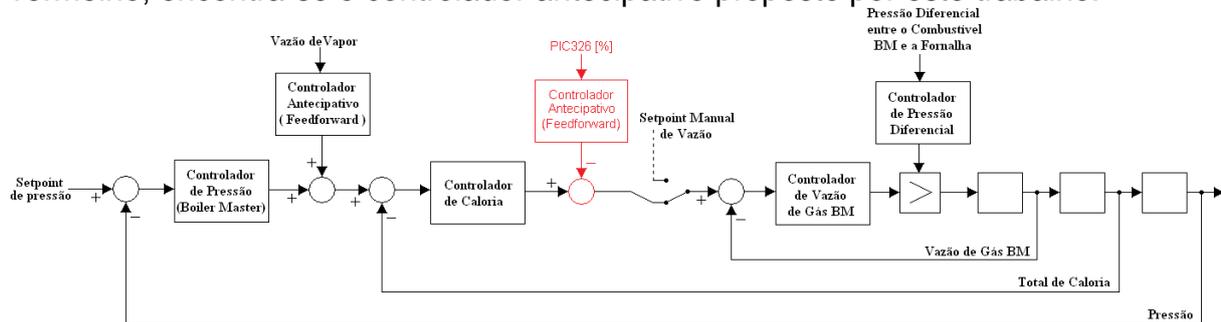


Figura 13 - Sistema de controle da CTE #1

A função de transferência do processo é dada por:

$$G_p = G_p^{\text{caloria}} \cdot \frac{G_p^{\text{vazão}} \cdot G_c^{\text{vazão}}}{1 + G_p^{\text{vazão}} \cdot G_c^{\text{vazão}}}$$

Em que:

$$G_p^{\text{caloria}} = 0,816 \left[ \frac{\text{Gcal}}{\text{Ndam}^3} \right]$$

$$G_p^{\text{vazão}} = \frac{0,8799}{2,925s + 1} e^{-3,25s} \approx \frac{0,8799}{6,175s + 1} \left[ \frac{\text{Ndam}^3}{\text{h}} \right]$$

$$G_c^{\text{vazão}} = 0,5556 + \frac{0,0347}{s}$$

Logo:

$$G_p = \frac{0,064598(s + 0,06246)}{(s + 0,2185)(s + 0,02263)}$$

O controlador sugerido é:

$$G_{ff} = \frac{-G_d}{G_p} = \frac{0,29208(s + 0,2185)(s + 0,02263)}{(s + 0,06246)(s + 0,01887)} (-0,0065 + 0,0001969V_V + 0,004140T_{BFG})$$

$$G_{ff} \approx \frac{(s + 0,1374)}{(s + 0,03929)} (-2,2781 + 0,0690V_V + 1,4510T_{BFG}) \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{Gcal/h}}{\%} \right]$$

A Figura 14 apresenta uma simulação do efeito do controlador antecipativo sobre a malha de controle de calor da caldeira da CTE #1. No experimento, foram utilizadas as seguintes premissas:

- Degrau de 60% na abertura da válvula de injeção de LDG ao BFG (PIC-326-MV);
- Caldeira operando com vazão de vapor igual a 250 t/h;
- Caldeira operando com taxa de BFG igual a 25%;
- Simulou-se apenas o comportamento das malhas de calor e de vazão, não foi computado o efeito da malha de pressão.

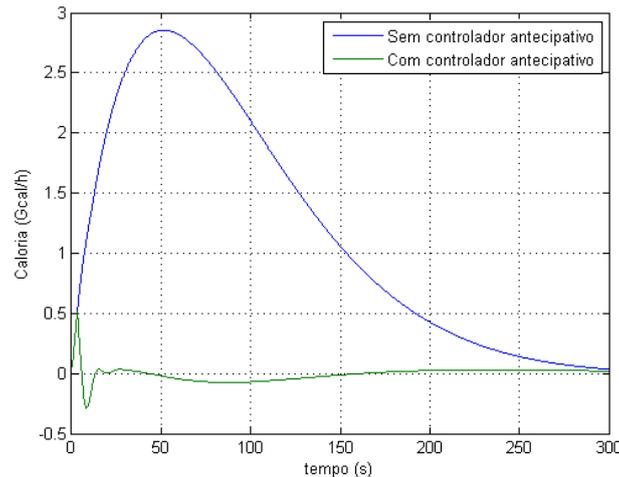


Figura 14 - Resposta a um degrau na injeção de LDG ao BFG – CTE #1

## 5.2 CTE #2

O sistema de controle da CTE #2 é idêntico ao da CTE #1 (Figura 13). A função de transferência do processo é dada por:

$$G_p = G_p^{\text{caloria}} \cdot \frac{G_p^{\text{vazão}} \cdot G_c^{\text{vazão}}}{1 + G_p^{\text{vazão}} \cdot G_c^{\text{vazão}}}$$

Em que:

$$G_p^{\text{caloria}} = 0,816 \left[ \frac{\text{Gcal}}{\text{Ndam}^3} \right]$$

$$G_p^{\text{vazão}} = \frac{1,271}{3,973s + 1} e^{-0,937s} \approx \frac{1,2719}{5,094s + 1} \left[ \frac{\text{Ndam}^3}{\text{h}} \right]$$

$$G_c^{\text{vazão}} = 0,5556 + \frac{0,0347}{s}$$

Logo:

$$G_p = \frac{0,1132(s + 0,06241)}{(s + 0,3068)(s + 0,02822)}$$

O controlador sugerido é:

$$G_{ff} = \frac{-G_d}{G_p} = \frac{0,13385(s + 0,3068)(s + 0,02822)}{(s + 0,06241)(s + 0,01515)} (+0,3447 - 0,001594V_V + 0,009314T_{BFG})$$

$$G_{ff} \approx \frac{(s + 0,1035)}{(s + 0,01985)} (+81,0493 - 0,3748V_V + 2,1900T_{BFG}) \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{Gcal/h}}{\%} \right]$$

A Figura 15 apresenta uma simulação do efeito do controlador antecipativo sobre a malha de controle de calor da caldeira da CTE #2. No experimento, foram utilizadas as seguintes premissas:

- Degrau de 60% na abertura da válvula de injeção de LDG ao BFG (PIC-326-MV);
- Caldeira operando com vazão de vapor igual a 250 t/h;
- Caldeira operando com taxa de BFG igual a 25%;
- Simulou-se apenas o comportamento das malhas de caloria e de vazão, não foi computado o efeito da malha de pressão.

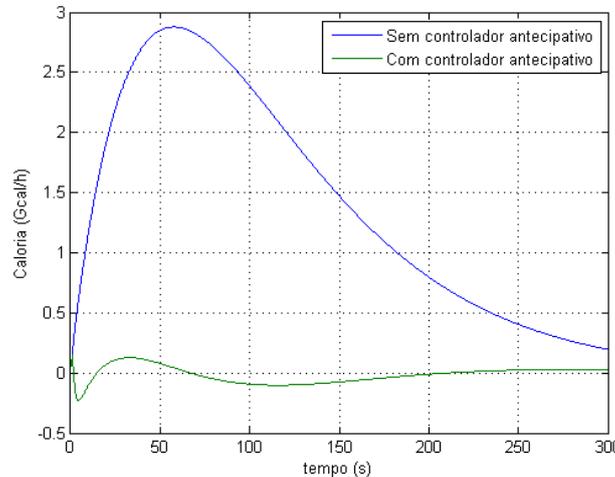


Figura 15 - Resposta a um degrau na injeção de LDG ao BFG – CTE #2

### 5.3 CTE #3

O sistema de controle atual da CTE #3 é dado pela Figura 16. Destacado em vermelho, encontra-se o controlador antecipativo proposto por este trabalho.

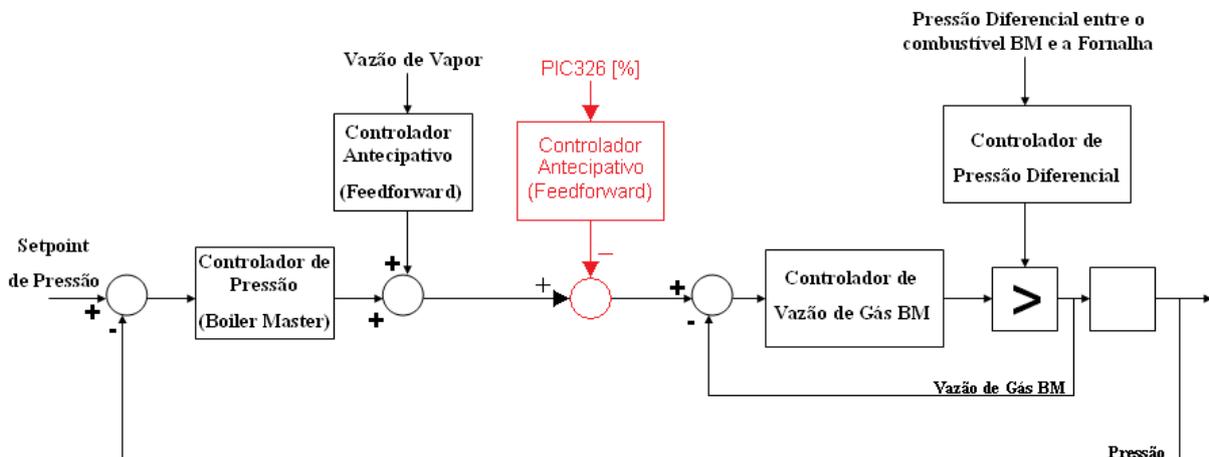


Figura 16 - Sistema de controle da CTE #3

A função de transferência do processo é dada por:

$$G_p = G_p^{caloria} \cdot \frac{G_p^{vazão} \cdot G_c^{vazão}}{1 + G_p^{vazão} \cdot G_c^{vazão}}$$

Em que:

$$G_p^{caloria} = 0,816 \left[ \frac{\text{Gcal}}{\text{Ndam}^3} \right]$$

$$G_p^{vazão} = \frac{2,25}{14s + 1} e^{-4s} \approx \frac{2,25}{18s + 1} \left[ \frac{\text{Ndam}^3}{\text{h}} \right]$$

$$G_c^{vazão} = 0,6329 + \frac{0,0452}{s}$$

Logo:

$$G_p = \frac{0,064556(s + 0,07142)}{(s^2 + 0,1347s + 0,00565)}$$

O controlador sugerido é:

$$G_{ff} = \frac{-G_d}{G_p} = \frac{15,49(s^2 + 0,1347s + 0,00565)}{(s + 1)(s + 0,07142)} (+0,0552 + 0,0001788V_V + 0,002580T_{BFG})$$

$$G_{ff} \approx \frac{(s + 0,08288)}{(s + 1,061)} (-855,0480 - 2,7696V_V - 39,9642T_{BFG}) \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{Gcal/h}}{\%} \right]$$

Neste caso foi assumido que o distúrbio possui um polo, e sua constante de tempo é  $\tau = 1s$ . A adição do polo foi necessária para que o controlador projetado fosse realizável. A escolha da constante de tempo se deve ao período de amostragem ( $\tau = T_s/2$ ) pois não é possível estimá-la com precisão, estando está abaixo do período de amostragem.

A Figura 17 apresenta uma simulação do efeito do controlador antecipativo sobre a malha de controle de calor da caldeira da CTE #2. No experimento, foram utilizadas as seguintes premissas:

- Degrau de 60% na abertura da válvula de injeção de LDG ao BFG (PIC-326-MV);
- Caldeira operando com vazão de vapor igual a 250t/h;
- Caldeira operando com taxa de BFG igual a 25%;

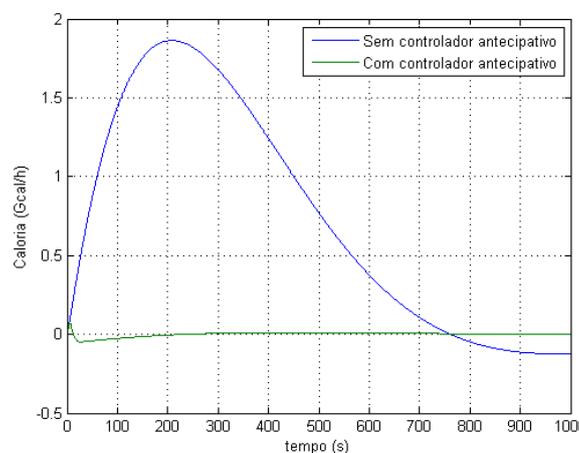


Figura 17 - Resposta a um degrau na injeção de LDG ao BFG – CTE #3

#### 5.4 CTE #4

O sistema de controle da CTE #4 é idêntico ao da CTE #1 (Figura 13).  
A função de transferência do processo é dada por:

$$G_p = G_p^{\text{caloria}} \cdot \frac{G_p^{\text{vazão}} \cdot G_c^{\text{vazão}}}{1 + G_p^{\text{vazão}} \cdot G_c^{\text{vazão}}}$$

Em que:

$$G_p^{\text{caloria}} = 0,816 \left[ \frac{\text{Gcal}}{\text{Ndam}^3} \right]$$

$$G_p^{\text{vazão}} = \frac{1,28}{9,621s + 1} \left[ \frac{\text{Ndam}^3}{\text{h}} \right]$$

$$G_c^{\text{vazão}} = 0,6329 + \frac{0,0452}{s}$$

Logo:

$$G_p = \frac{0,06871(s + 0,07142)}{(s + 0,1473)(s + 0,04082)}$$

O controlador sugerido é:

$$G_{ff} = \frac{-G_d}{G_p} = \frac{0,16539(s + 0,1473)(s + 0,04082)}{(s + 0,07142)(s + 0,01136)} (+0,0675 - 0,001332V_V + 0,01536T_{BFG})$$

$$G_{ff} \approx \frac{(s + 0,06883)}{(s + 0,01182)} (+14,2061 - 0,2803V_V + 3,2327T_{BFG}) \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{Gcal/h}}{\%} \right]$$

A Figura 18 apresenta uma simulação do efeito do controlador antecipativo sobre a malha de controle de calor da caldeira da CTE #4. As seguintes premissas foram adotadas:

- Degrau de 60% na abertura da válvula de injeção de LDG ao BFG (PIC-326-MV);
- Caldeira operando com vazão de vapor igual a 250 t/h;
- Caldeira operando com taxa de BFG igual a 25%;
- Simulou-se apenas o comportamento das malhas de calor e de vazão, não foi computado o efeito da malha de pressão.

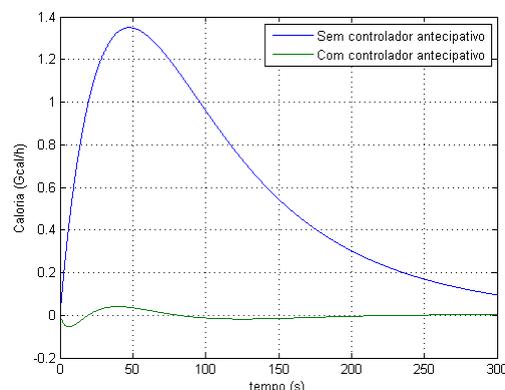


Figura 18 - Resposta a um degrau na injeção de LDG ao BFG – CTE #4

## 5.5 Resumo do projeto dos controladores antecipativos

Os resultados estão resumidos no quadro abaixo:

**Quadro 3** - Controladores antecipativos

CTE	Controlador
CTE #1	$\frac{(7,2780s + 1)}{(25,4518s + 1)} (-7,9667 + 0,2413V_V + 5,0743T_{BFG}) \times 10^{-3}$
CTE #2	$\frac{(9,6618s + 1)}{(50,3778s + 1)} (422,5996 - 1,9542V_V + 11,4189T_{BFG}) \times 10^{-3}$
CTE #3	$\frac{(12,0656s + 1)}{(0,9425s + 1)} (66,7921 + 0,0781V_V + 8,6461T_{BFG}) \times 10^{-3}$
CTE #4	$\frac{(14,5285s + 1)}{(84,6024s + 1)} (82,7247 - 1,6322V_V + 18,8246T_{BFG}) \times 10^{-3}$

Nota: todos os controladores estão em  $\left[ \frac{gcal/h}{\%} \right]$ .

## 5 CONCLUSÃO

Foram projetados os controladores antecipativos para redução dos distúrbios causados pela injeção de LDG à rede de BFG em cada uma das CTEs #1, #2, #3 e #4.

Todos os controladores aqui projetados atuam sobre o fluxo de calor total para cada caldeira. Deve ser observada a conversão adequada do sinal de calor para o sinal de vazão, o que depende do combustível selecionado como Master Fuel.

Espera-se uma redução considerável das oscilações provocadas pela injeção de LDG (ou MG) ao BFG com a implantação das melhorias propostas. Nas simulações realizadas, a amplitude das oscilações de fluxo de calor com o controlador sofreu atenuações entre 80% e 95% em comparação com os casos sem o controle antecipativo.

## REFERÊNCIAS

1. LORA, Electo Eduardo Silva e NASCIMENTO, Marco Antônio Rosa do. Geração Térmica: Planejamento, Projeto e Operação – Volume 1, Rio de Janeiro: Interciência, 2004.
2. LORA, Electo Eduardo Silva e NASCIMENTO, Marco Antônio Rosa do. Geração Térmica: Planejamento, Projeto e Operação – Volume 2, Rio de Janeiro: Interciência, 2004.
3. XAVIER, Edna Elias. Termeletricidade no Brasil: Proposta metodótica para inventário das emissões aéreas e sua aplicação para o caso do CO<sub>2</sub>. 2004. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
4. OGATA, Katsuhico. Engenharia de controle moderno, Rio de Janeiro: Prentice/Hall do Brasil Ltda, 1982.
5. FILHO, Geraldo Passos. Instrumentação Analítica, 2006. Apostila do curso oferecido pelo SENAI, Vitória, 2006.
6. BAZANELLA, Alexandre Sanfelice e JUNIOR, João Manoel Gomes da Silva. Ajuste de Controladores PID. 2000. Disponível em: < [www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/apostila.html](http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/apostila.html)>. Acesso em: 10 out. 2006.
7. FLUIDOS III: Medidores comuns de vazão. 2005. Disponível em: < [www.mspc.eng.br/fldetc/fluido3.asp](http://www.mspc.eng.br/fldetc/fluido3.asp)>. Acesso em: 10 out. 2006.
8. COSTA, Fernando. Fundamentos Sobre Gases Combustíveis. 2005. Disponível em: < [www.krona.srv.br/display05.htm#top](http://www.krona.srv.br/display05.htm#top)>. Acesso em: 15 out. 2006.
9. WALKER, HallidayResnick. Fundamentos da Física: Termodinâmica – 4.ed. São Paulo, JC Livros Técnicos e Científicos SA. 2003.
10. OperationandMaintenance Manual for Power andBlowerPlant – Unit 4. Japão, MITSUBISHI. 2004.