

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Otimização da Distribuição de Vapor e Energia  
Elétrica de uma Indústria Petroquímica**

**Eduardo Guimarães de Magalhães**

**Orientadores:**

**Prof. Dr. Argimiro Resende Secchi**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Keiko Wada**

**Porto Alegre**

**2006**

## AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Argimiro R. Secchi e Keiko Wada pela orientação profissional durante a realização deste trabalho.

Aos bolsistas de iniciação científica, agora engenheiros Felipe S. Duarte e Tiago Fronza pela dedicação, competência e pró-atividade na etapa mais árdua deste trabalho.

À Copesul – Companhia Petroquímica do Sul pela oportunidade de desenvolvimento e de contribuição e pelos recursos disponibilizados. Aos colegas da Unidade de Engenharia e da Unidade de Utilidades pelo investimento, orientação e paciência. Ao Orlando e José Maria pelo direcionamento e incentivo, e pelo compartilhamento de sua experiência e sabedoria. A Carlos Marcelo, Andréa, Marcelo e Daniela pela troca de idéias e motivação.

A todos os profissionais do Departamento de Engenharia Química da UFRGS pelo aprendizado e oportunidade. Aos membros da banca por aceitarem avaliar este trabalho e por contribuírem com sua experiência.

À minha família pelo constante suporte, otimismo e busca do equilíbrio. À minha esposa pelo seu amor e paciência, pelos momentos de superação e pela presença inspiradora. À minha mãe pelo carinho e constante disposição, e pela vida. Ao meu pai pela amizade e pelas lições de luta e responsabilidade, e pela vida. A minha irmã e família, pelos momentos de descontração. À família de minha esposa, pela hospitalidade e incentivo.

## *Dedicatória*

Dedico este trabalho ao meu pai  
Paulo Roberto pela sua trajetória  
e pelo exemplo de vida.

## RESUMO

O uso racional de utilidades (energia elétrica, vapor e água) representa atualmente o grande desafio para garantir a competitividade e sustentabilidade das indústrias. O custo da energia e os limites ambientais associados à atividade são estratégicos para perpetuar o negócio industrial, ainda mais se depender da vida do setor de refino de petróleo. O trabalho proposto apresenta a minimização do custo da geração de energia em uma empresa petroquímica, que possui produção de energia elétrica e vapor através de um sistema de cogeração. Neste caso, há um equilíbrio a ser buscado entre suprimento de energia de potência e térmica e isto não pode ser rapidamente definido a partir de procedimentos ou malhas de controle localizadas. A aplicação de um modelo de otimização é proposto, baseando-se nas demandas de energia e flexibilidades existentes e rapidamente expondo a configuração que minimiza o custo de produção de vapor e energia elétrica (custo da central termoeletrica). Esta meta foi obtida aplicando duas ferramentas: uma planilha para resgatar, reconciliar, tratar, organizar dados e em seguida exportar informações para a segunda ferramenta, o modelo de otimização no qual o problema da central termoeletrica é construído e solucionado através de algoritmos adequados. Após, o trabalho também envolveu o estudo de 14 casos. O resultado obtido consolida o potencial para otimização: é possível reduzir em cerca de 7% (pelo menos) o custo da unidade termoeletrica, com pequenas intervenções de manutenção e ajustes operacionais. Estes dados são associados com a possibilidade de redução da geração de vapor e demandas de energia elétrica e também com a redução do uso de válvulas redutoras de pressão, na maioria dos casos.

## **ABSTRACT**

The rational use of utilities (electric energy, steam, and water) represents nowadays the great challenge to assure the competitiveness and sustainability of industries. The energy cost and the associated environmental limits are strategic to perpetuate the industrial business, even more if it depends upon the oil sector life. The proposed work presents the minimization of the cost of steam and power generation in a petrochemical company, which has production of electric energy and steam by co-generation system. In this case, there is a balance to achieve between work and heat supply and this cannot be readily defined by heuristics or localized control loops. The application of an optimization model is proposed based on needs of energy demands and existing flexibilities, and readily exposing the scenario that minimizes the power and high pressure steam level production. This goal was obtained applying two tools: one flow sheet for rescue, reconcile, treat, organize data and then export information for the second, the optimization model in which the thermoelectric problem is constructed and then solved by proper algorithms. After, this work also develop and study of 14 cases. The results obtained consolidate the potential for optimization: it is possible to reduce in about 7% (at least) the cost of the thermoelectric unity, with little maintenance and operational adjustments. These figures are associated with the possibility of reducing the steam generating and power needs and also reducing the use of letdown stations, in most cases.

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

77TBG	Gerador de energia elétrica a combustão (turbina a gás)
7TBG	Turbina a vapor acionadora de gerador de energia elétrica a vapor
7TG	Gerador de energia elétrica a vapor
ad	Vazão de água desmineralizada – parâmetro fixo ( $t.h^{-1}$ )
AD	Vazão de água desmineralizada – variável manipulável ( $t.h^{-1}$ )
AR	Água de resfriamento
BFW	Água de alimentação de caldeiras e fornos
C	Compressor
ca	Vazão de condensado de alta pressão – parâmetro fixo ( $t.h^{-1}$ )
CA	Vazão de condensado de alta pressão – variável manipulável ( $t.h^{-1}$ )
cb	Vazão de condensado de baixa pressão – parâmetro fixo ( $t.h^{-1}$ )
CB	Vazão de condensado de baixa pressão – variável manipulável ( $t.h^{-1}$ )
cm	Vazão de condensado de média pressão – parâmetro fixo ( $t.h^{-1}$ )
CM	Vazão de condensado de média pressão – variável manipulável ( $t.h^{-1}$ )
co	Taxa de custo – parâmetro fixo ( $R\$.h^{-1}$ )
CO	Taxa de custo - variável manipulável ( $R\$.h^{-1}$ )
$C_p$	Calor específico a pressão constante ( $KJ.kg^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )
cs	Vazão de condensado de super alta pressão – parâmetro fixo ( $t.h^{-1}$ )
CS	Vazão de condensado de super alta pressão – variável manipulável ( $t.h^{-1}$ )
cv	Vazão de condensado de vácuo – parâmetro fixo ( $t.h^{-1}$ )
CV	Vazão de condensado de vácuo – variável manipulável ( $t.h^{-1}$ )
E	Taxa de energia gerada em turbina genérica (MW)
ETA	Estação de tratamento de água

F	Fornos petroquímicos de pirólise
GV	Geradores complementares de vapor (caldeiras de Utilidades)
$h$	Entalpia específica ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ )
h	Índice caracterizando sistema gerador de VS
i	Índice caracterizando sistema gerador de VA
j	Índice caracterizando sistema gerador de VM
k	Índice caracterizando sistema gerador de VB
l	Índice caracterizando sistema gerador de CV
ld	Índice caracterizando válvula redutora de pressão
$\dot{m}$	Taxa de massa de fluxo genérico, identificado por seu índice ( $\text{t.h}^{-1}$ )
M	Taxa de massa de vapor de alimentação ( $\text{t.h}^{-1}$ )
MB	Motor elétrico acionador de bomba
ms	Índice caracterizando motor de equipamento com acionamento cambiável
MVT	Motor elétrico acionador de ventilador
n	Número de certo tipo de equipamentos cuja operação é necessária
$N_{\text{aliv}}$	Número total de válv. de alívio de determinada pressão
$N_{\text{cons}}$	Número total de consumidores de vapor de determinada pressão
$N_{\text{ger}}$	Número total de produtores de vapor de determinada pressão
$nr$	Rotação de bomba ou ventiladores (rpm)
$N_{\text{red}}$	Número total de válv. redut. com determinado tipo de alimentação e saída
$nt$	Rotação de turbina (rpm)
o	Índice caracterizando sistema consumidor de VS para potência
oc	Índice caracterizando consumidor de VS para calor
p	Índice caracterizando sistema consumidor de VA para potência
P	Permutador de calor
$P$	Pressão ( $\text{kgf.cm}^{-2}$ )
pc	Índice caracterizando consumidor de VA para calor ou exportação
pf	Índice caracterizando consumidor fixo de potência elétrica
PFD	Fluxograma de processo
PGM	Parada geral de manutenção

PIC	Controlador-indicador de pressão
PID	Fluxograma de tubulação e instrumentação
PN	Painel elétrico
Po	Potência – parâmetro fixo (MW)
PO	Potência – variável manipulável (MW)
ponta	Índice caracterizando o período de consumo de ponta (energia elétrica)
Pr	Potência desenvolvida em bomba ou ventilador (MW)
ps	Índice caracterizando gerador ou importador de potência elétrica
Pt	Potência desenvolvida em turbina (MW)
PV	Válvula controladora de pressão
q	Índice caracterizando sistema consumidor de VM para potência
Q <sub>abs</sub>	Calor absorvido (GJ/h)
qc	Índice caracterizando consumidor de VM para calor ou exportação
r	Índice caracterizando sistema consumidor de VB para potência
ro	rotação – parâmetro fixo (rpm)
RO	Rotação – variável manipulável (rpm)
s	Disponibilidade de equipamento – parâmetro binário fixo (0 ou 1)
S	Taxa de massa de vapor de extração em turbina genérica (t.h <sup>-1</sup> )
SAD	Sistema de aquisição de dados
SDCD	Sistema digital de controle distribuído
SE	Sub estação
t	Índice caracterizando alívio de VS
T	Temperatura (°C)
TBB	Turbina acionadora de bomba
TBC	Turbina a vapor acionadora de compressor
TBVT	Turbina a vapor acionadora de ventilador
TQ	Tanque
ts	Índice referente a turbina de equipamento com acionamento cambiável
u	Índice caracterizando alívio de VB
V	Vaso

V	Vazão de vapor genérica ( $t.h^{-1}$ )
va	Vazão de vapor de alta pressão – parâmetro fixo ( $t.h^{-1}$ )
VA	Vazão de vapor de alta pressão – variável manipulável ( $t.h^{-1}$ )
VA/VB	Índice caracterizando equipamento com entrada de VA e saída de VB
VA/VM	Índice caracterizando equipamento com entrada de VA e saída de VM
VAFX	Índice caracterizando saídas fixas de vapor do coletor de VA
vb	Vazão de vapor de baixa pressão – parâmetro fixo ( $t.h^{-1}$ )
VB	Vazão de vapor de baixa pressão – variável manipulável ( $t.h^{-1}$ )
VBFX	Índice caracterizando saídas fixas de vapor do coletor de VB
vm	Vazão de vapor de média pressão – parâmetro fixo ( $t.h^{-1}$ )
VM	Vazão de vapor de média pressão – variável manipulável ( $t.h^{-1}$ )
VM/VB	Índice caracterizando equipamento com entrada de VM e saída de VB
VMFX	Índice caracterizando saídas fixas de vapor do coletor de VM
vs	Vazão de vapor de super alta pressão – parâmetro fixo ( $t.h^{-1}$ )
VS	Vazão de vapor de super alta pressão – variável manipulável ( $t.h^{-1}$ )
VS/VB	Índice caracterizando equipamento com entrada de VS e saída de VB
VSFX	Índice caracterizando saídas fixas de vapor do coletor de VS
VT	Ventilador
z	Condição de operação de sistema – variável binária (0 ou 1)
$\varphi$	Fator de redução

# SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>ix</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>9</b>
2.1 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO.....	9
2.2 TURBINAS E LINHAS DE WILLANS.....	17
2.3 CONTEXTO DO TRABALHO.....	20
<b>DESCRIÇÃO DO SISTEMA TERMOELÉTRICO ESTUDADO.....</b>	<b>23</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	23
3.2 SISTEMA DE VAPOR.....	25
3.2.1 Sistema de Vapor de Super Alta Pressão (VS).....	32
3.2.2 Sistema de Vapor de Alta Pressão (VA).....	33
3.2.3 Sistema de Vapor de Média Pressão (VM).....	34
3.2.4 Sistema de Vapor de Baixa Pressão (VB).....	35
3.2.5 Aspectos da Geração de Vapor.....	37
3.3 SISTEMA ELÉTRICO.....	39
3.3.1 Turbogeneradores a Vapor.....	40
3.3.2 Turbogenerador a Combustão (Turbina a Gás).....	41
3.3.3 Importação da Concessionária.....	42
<b>METODOLOGIA DE TRABALHO.....</b>	<b>42</b>
4.1 TRATAMENTO DE DADOS.....	48
4.1.1 Banco de Dados de Equipamentos.....	51
4.1.1.1 Geradores de VS (Caldeiras e Fornos).....	52

4.1.1.2 Turbinas de Extração-Condensação e Extração-Contrapressão.....	52
4.1.1.3 Equipamentos com medição de vazão disponível via SAD.....	52
4.1.1.4 Turbinas com medição de rotação disponível via SAD.....	53
4.1.1.5 Turbinas de bombas que possuem medição de vazão de água.....	56
4.1.1.6 Turbinas de equipamentos com informação de status de operação.....	59
4.1.1.7 Vasos de Flash de Condensado.....	60
4.1.1.8 Válvulas Redutoras de Pressão.....	63
4.1.1.9 Válvulas de Alívio de Pressão.....	65
4.1.1.10 Vaso Desaerador.....	66
4.1.1.11 Permutadores de Calor sem medição de Vapor.....	69
4.1.1.12 Equipamentos sem nenhum sinal de Operação.....	70
4.1.2 Planilhas de Balanço.....	71
4.1.3 Diagramas do Sistema de Vapor.....	72
4.1.4 Interfaces de Exportação.....	74
4.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DO SISTEMA.....	76
4.2.1 Formulação da Rede Termoelétrica.....	77
4.2.2 Modelagem de Turbinas de Dois Estágios.....	83
4.2.2.1 Equações de Balanço.....	84
4.2.2.2 Equações de Performance.....	84
4.2.2.3 Modelagem das Turbinas de Turbogeneradores a Vapor.....	87
4.2.2.4 Modelagem das Turbinas de Compressores de Olefinas 1.....	87
4.2.2.5 Modelagem das Turbinas de Compressor de Olefinas 2.....	89
4.2.3 Modelagem dos Equipamentos com Possibilidade de Seleção de Acionador.....	91
4.2.4 Restrições e Aplicação de Algoritmos.....	92
4.2.5 Implementação.....	94
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>97</b>
5.1 CUSTO OPERACIONAL.....	103
5.2 PRODUÇÃO DE VAPOR NAS CALDEIRAS DE UTILIDADES.....	104
5.3 DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA.....	105
5.4 ENERGIA ELÉTRICA NA TURBINA A GÁS.....	106
5.5 VÁLVULAS REDUTORAS DE VAPOR VS/VA.....	107
5.6 VÁLVULAS REDUTORAS DE VAPOR VA/VM.....	108
5.7 VÁLVULAS REDUTORAS DE VAPOR VM/VB.....	109

<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>110</b>
6.1 FUTURO.....	112
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>117</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>121</b>
<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>135</b>
<b>APÊNDICE D.....</b>	<b>149</b>
<b>APÊNDICE E.....</b>	<b>155</b>
<b>APÊNDICE F.....</b>	<b>169</b>
<b>APÊNDICE G.....</b>	<b>178</b>
G.1 CENÁRIO 1.....	178
G.2 CENÁRIO 2.....	180
G.3 CENÁRIO 3.....	181
G.4 CENÁRIO 4.....	183
G.5 CENÁRIO 5.....	184
G.6 CENÁRIO 6.....	186
G.7 CENÁRIO 7.....	187
G.8 CENÁRIO 8.....	188
G.9 CENÁRIO 9.....	189
G.10 CENÁRIO 10.....	190
G.11 CENÁRIO 11.....	191
G.12 CENÁRIO 12.....	192
G.13 CENÁRIO 13.....	193
G.14 CENÁRIO 14.....	194

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> Variação da temperatura na superfície terrestre.....	3
<b>FIGURA 2.</b> Diagrama de capacidade de uma turbina de duplo estágio.....	19
<b>FIGURA 3.</b> Volume de controle estudado da rede de vapor.....	27
<b>FIGURA 4.</b> Representação da rede de vapor do sistema termoelétrico estudado.....	45
<b>FIGURA 5.</b> Curva de consumo da turbina de ventilador de tiragem forçada da caldeira a óleo da empresa estudada.....	55
<b>FIGURA 6.</b> Detalhe da curva de capacidade versus potência para bomba de água de resfriamento.....	57
<b>FIGURA 7.</b> Curva da potência gerada em função do consumo de vapor.....	58
<b>FIGURA 8.</b> Representação de um vaso de <i>flash</i> de vapor.....	61
<b>FIGURA 9.</b> Correntes em uma válvula redutora de pressão.....	63
<b>FIGURA 10.</b> Esquema de fluxos em sistema desaerador.....	67
<b>FIGURA 11.</b> Gráfico de pontos experimentais de calor absorvido no economizador e potência gerada na turbina a gás.....	79
<b>FIGURA 12.</b> Redução de custo operacional da central termoelétrica.....	103
<b>FIGURA 13.</b> Variação da produção de vapor nas diversas situações em relação ao caso real.....	104
<b>FIGURA 14.</b> Redução da demanda de energia elétrica da empresa em relação ao caso real.....	105
<b>FIGURA 15.</b> Produção de energia elétrica na turbina a gás.....	106
<b>FIGURA 16.</b> Vazão de vapor através das válvulas redutoras VS/VA.....	107
<b>FIGURA 17.</b> Vazão de vapor através das válvulas redutoras VA/VM.....	108
<b>FIGURA 18.</b> Vazão de vapor através das válvulas redutoras VM/VB.....	109

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1.</b> Distribuição do consumo de energia no Brasil.....	2
<b>TABELA 2.</b> Relação entre potência gerada e vapor consumido para turbina de ventilador de tiragem forçada de caldeira a óleo.....	56
<b>TABELA 3.</b> Relação entre vazão e potência consumida em bomba de água de resfriamento.....	57
<b>TABELA 4.</b> Relação entre potência gerada e vapor consumido na turbina.....	59
<b>TABELA 5.</b> Estados referentes aos quatro níveis de vapor e de água desmineralizada para dessuperaquecimento.....	64
<b>TABELA 6.</b> Vazão de vapor pelas válvulas de alívio a partir de comando do controlador de pressão máxima do coletor.....	66
<b>TABELA 7.</b> Parâmetros das turbinas dos turbogeradores, ajustados a partir de pontos experimentais.....	87
<b>TABELA 8.</b> Entalpias de VS, VM e vapor exausto para as turbinas dos compressores de propeno refrigerante da planta de Processo 1.....	88
<b>TABELA 9.</b> Parâmetros das equações das turbinas dos compressores de propeno refrigerante da planta de Processo 1.....	89
<b>TABELA 10.</b> Entalpias de VS, VA e VM para as turbinas do compressor de gás craqueado da planta de Processo 2.....	90
<b>TABELA 11.</b> Parâmetros das equações da turbina do compressor de gás craqueado da planta de Processo 2 .....	91
<b>TABELA 12.</b> Restrições das variáveis envolvidas no modelo de otimização da rede termoelétrica.....	93
<b>TABELA 13.</b> Verificação da precisão obtida na modelagem e balanço material da rede de vapor.....	98
<b>TABELA 14.</b> Custos médios mensais utilizados nas avaliações dos cenários ótimos para as 14 situações estudadas.....	102

<b>TABELA 15.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 07/05/05, para comparação com o cenário real (atual).....	179
<b>TABELA 16.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 29/05/05, para comparação com o cenário real (atual).....	181
<b>TABELA 17.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 06/06/05, para comparação com o cenário real (atual).....	182
<b>TABELA 18.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 27/06/05, para comparação com o cenário real (atual).....	184
<b>TABELA 19.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 10/07/05, para comparação com o cenário real (atual).....	185
<b>TABELA 20.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 14/08/05, para comparação com o cenário real (atual).....	187
<b>TABELA 21.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 23/08/05, para comparação com o cenário real (atual).....	188
<b>TABELA 22.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 17/09/05, para comparação com o cenário real (atual).....	189
<b>TABELA 23.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 19/09/05, para comparação com o cenário real (atual).....	190
<b>TABELA 24.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 20/09/05, para comparação com o cenário real (atual).....	191
<b>TABELA 25.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 03/10/05, para comparação com o cenário real (atual).....	192
<b>TABELA 26.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 09/02/06, para comparação com o cenário real (atual).....	193
<b>TABELA 27.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 21/02/06, para comparação com o cenário real (atual).....	194
<b>TABELA 28.</b> Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para o cenário de 23/02/06, para comparação com o cenário real (atual).....	195

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Fundamental ao estilo de vida moderno, a energia elétrica é uma valiosa, versátil e controlável forma de energia, da qual o ser humano ainda dependerá no futuro próximo. Em 1985, a geração de eletricidade contabilizou 29% do uso mundial de energia que na época foi estimado em cerca de 166 milhões de barris de óleo equivalente por dia (mboed). Dos 48 mboed utilizados para geração elétrica, 33 mboed foram perdidos na conversão e 2 mboed foram perdidos em transmissão. Carvão correspondeu a 42% dos 48 mboed, sendo que às participações de gás natural, petróleo, geração hidroelétrica e nuclear foram atribuídos respectivamente 15%, 12%, 19% e 12%. Apenas 32% dos 48 mboed efetivamente atingiram consumidores (industrial, comercial e residencial) na forma de energia elétrica (*Commonwealth of Virginia – Department of Environmental Quality*, 1994). No Brasil, o consumo de eletricidade vem liderando a matriz energética desde 1980, conforme pode ser observado na tabela 1 (REIS, 2001).

Dentro deste cenário, a indústria do petróleo e petroquímica possui uma posição de destaque pela participação tanto na geração de calor e trabalho (incluindo geração elétrica), quanto ao próprio consumo energético devido aos processos eletro-intensivos de refino. O petróleo atualmente é maior fonte individual de energia para os Estados Unidos, com um consumo médio de 9 kg de petróleo por habitante por dia e sendo crítico para economia e qualidade de vida, devido sua aplicação em transporte, aquecimento e uso industrial. O petróleo também é a fonte fundamental de matéria-prima para indústria petroquímica. No século 21, a indústria do petróleo deverá se preparar para enfrentar diversos desafios, sendo que as maiores forças envolvidas são: concorrência global, aumento da demanda de combustíveis, políticas reguladoras e

preocupação contínua com o meio ambiente (THE TECHNOLOGY ROADMAP FOR THE PETROLEUM INDUSTRY, 2000).

TABELA 1: Distribuição do consumo de energia no Brasil  
(Participação em %)

Combustível	Ano			
	1970	1980	1990	1999
Diesel	7,6	12,1	12,0	12,3
Óleo Combustível	9,4	12,5	5,6	4,5
Gasolina	10,5	6,8	4,3	6,0
Gás Natural	0,1	0,7	1,8	2,4
Eletricidade	16,6	27,9	37,3	39,5
Carvão Mineral	2,4	3,7	4,5	4,1
Madeira	42,7	20,2	12,6	7,5
Álcool	0,4	1,3	3,6	3,1
Outros	10,3	14,8	18,3	20,6

Fonte: Ministério de Minas e Energia, Brasil (2000)

Quanto à questão ambiental, a maior preocupação relaciona-se à intensificação do chamado Efeito Estufa causado principalmente pelo aumento da concentração na atmosfera de certos gases, ditos gases do efeito estufa (GEE) que impedem a liberação para o espaço do calor emitido pela superfície terrestre, a partir de seu aquecimento pelo sol. Dentre os gases de efeito estufa (GEE), os mais significativos são o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o metano ( $\text{CH}_4$ ). A concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera, que era de 280 ppm na era pré-industrial, já atinge hoje o nível de 375 ppm, causado principalmente pelas emissões acumuladas desde a Revolução Industrial na queima de combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural) e em menor escala, pelo desmatamento da cobertura vegetal do planeta (NÚCLEO DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA – BRASIL, 2005). Inúmeras pesquisas realizadas por estudiosos do clima e áreas afins têm demonstrado, através de registros históricos, um aumento progressivo da temperatura atmosférica e apontam para um aumento da temperatura média global na

faixa de 1,4 a 5,8 °C, conforme Figura 1. Outros efeitos diretos são: a variação global das precipitações a partir da variação no teor de vapor d'água presentes na atmosfera, derretimento de gelo no mar, aumento do nível do mar (de 10 a 30 cm) causado pelo derretimento de geleiras e pela expansão térmica do volume de água, resfriamento estratosférico causado pela retenção de radiação na baixa atmosfera e pela diminuição da retenção de radiação ultravioleta, devido à redução da camada de ozônio (VERÍSSIMO, 2003).

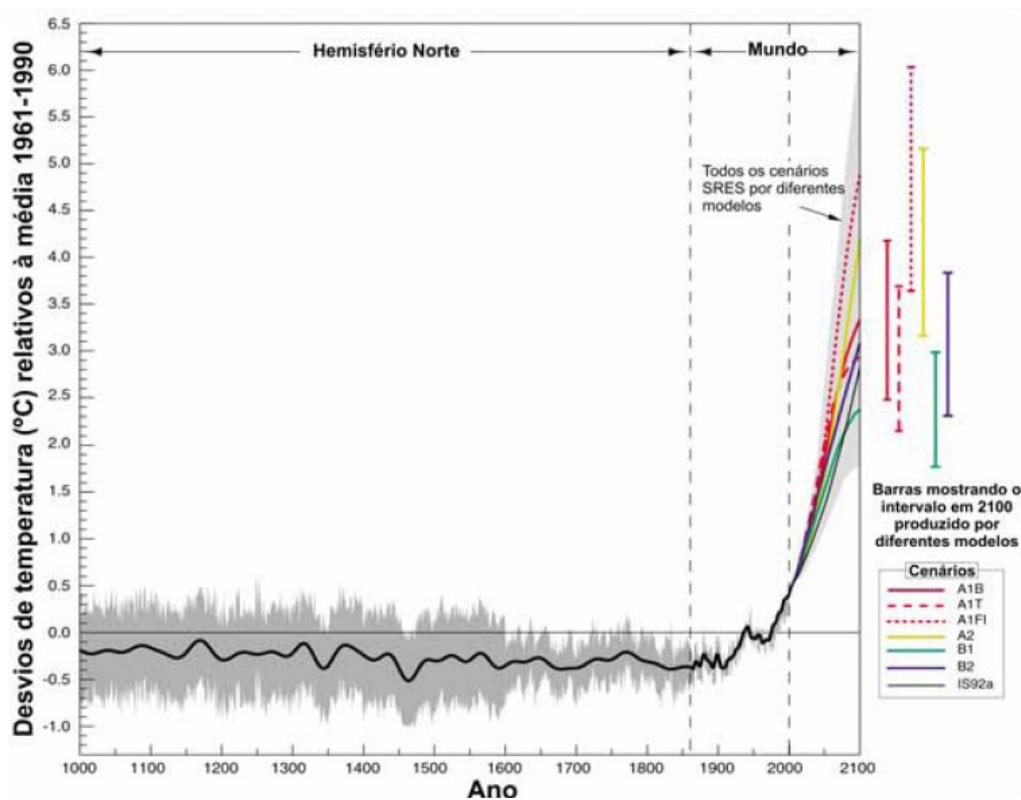


Figura 1: Variação da temperatura na superfície terrestre (Fonte: IPCC, 2001)

A Convenção do Clima conta com um tratado internacional de caráter essencialmente universal é firmado e ratificado por praticamente todos os países. O objetivo da Convenção é o de estabilizar a concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, em níveis tais que evitem a interferência perigosa no sistema climático, ou pelo menos diminuir a magnitude da mudança do clima. O Protocolo de Quioto

representa o principal avanço obtido na Convenção, estabelecendo limites para a emissão de GEE dos países do Anexo I (Membros da OCDE e economias em transição), que deverão no período 2008-2012 reduzir a emissão total em 5,2% do total emitido por eles em 1990. O fato de os países do Anexo I terem metas, e os países em desenvolvimento não as terem cria grande expectativa no país pelos benefícios que poderá trazer para o Brasil, através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que canaliza recursos financeiros para projetos de desenvolvimento sustentável. Esses projetos deverão incentivar o maior conhecimento científico e a adoção de inovações tecnológicas. (NÚCLEO DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2005).

O termo “uso racional de energia” está ligado ao conceito de conservação e a técnicas ou procedimentos que visam reduzir o desperdício e o uso ineficiente da energia, sem comprometer o conforto e a produtividade. Esta área tecnológica tornou-se emergente principalmente devido às crises de 1973-74 e 1979-80, a partir das quais muitos países buscaram reduzir a dependência de suas economias às oscilações drásticas de preço do petróleo. As principais estratégias adotadas foram: aumentar a eficiência dos processos de conversão de energia, substituir o consumo de óleo combustível em usinas convencionais (ciclo a vapor) por outros tipos de combustíveis (carvão e gás natural, por exemplo) e investir em outras alternativas (como o segmento nuclear). Outras formas de energia, como eólica, solar e biomassa começaram a ocupar nichos específicos de mercado em alguns países (STRAPASSON, 2004).

Trata-se de um efeito direto da escassez (e no futuro, o esgotamento total das reservas planetárias) de petróleo e das questões geopolíticas e ambientais, levando os países mais desenvolvidos a procurar novos processos de produção que permitissem otimizar seus resultados (mantendo a capacidade produtiva, mas despendendo menos de energia). Conforme estudos feitos pelo Departamento de Energia dos EUA, a relação entre demanda de energia e Produto Interno Bruto (PIB) mundial tende a decrescer em 0,95 %. O esforço maior para esta redução global vem justamente dos países mais desenvolvidos (a projeção é de uma queda de 2,85% ao ano para um crescimento anual

do PIB de 2,7%). Nos países em desenvolvimento, o percentual estimado é bem menor, de 1,15% ao ano, para um crescimento anual do PIB de cerca de 5%. Isto ocorre pelo fato de que os países desenvolvidos possuem meios de buscar a otimização de processos produtivos (e, mais importante, já têm uma estrutura produtiva bastante ampla). Já os países em desenvolvimento necessitam continuar seu processo de crescimento - o que requer ampliações constantes na estrutura e uso crescente de energia.

De maneira genérica, a economia de energia pode ser aplicada em diversos níveis por meio de (DIAS, 2006):

1. Eliminação dos desperdícios;
2. Aumento da eficiência das unidades consumidoras de energia;
3. Aumento da eficiência das unidades produtoras de energia;
4. Reaproveitamento dos recursos naturais pela reciclagem e redução do conteúdo energético dos produtos e serviços;
5. Rediscussão das relações centro-periferia em setores como transporte e indústria;
6. Mudança dos padrões de consumo em favor de produtos e serviços que requerem menor uso de energia;

A importância do assunto emerge da análise do cenário energético mundial, onde se observa que, como necessidade fundamental, há uma relação direta entre desenvolvimento humano e consumo de energia (75% da população mundial vive em países em desenvolvimento com uma significativa demanda reprimida) e que o aumento do consumo de energia, com base nos modelos atuais, implica uma série de investimentos que podem resultar em degradação ambiental. Dessa forma, desenvolver formas de garantir a energia para as necessidades básicas bem como para propiciar melhorias do padrão de vida, segundo critérios racionais e adequados, é parte fundamental do processo de desenvolvimento sustentável.

É dentro deste contexto atual de crescimento sustentável e de turbulência no preço do barril de petróleo (atingindo valores da ordem de US\$ 70), que as operações

otimizadas de sistemas de energia, nos últimos anos, vêm tornando-se parte importante da estratégia de gerenciamento do negócio de empresas do setor industrial. Não faz sentido avançar em ampliações de sistemas de suprimento sem antes se buscar aproximação do potencial operacional de uso racional de energia.

A cogeração é uma das práticas mais incentivadas com o intuito de buscar melhores índices de eficiência energética, com menor consumo de combustíveis e assim maior sustentabilidade ambiental em sistemas de demandas de potência e calor da mesma ordem de grandeza. A indústria petroquímica é um dos ambientes mais propícios a sua aplicação. Todavia, dependendo da complexidade e do foco do negócio, o potencial de ganho econômico com a flexibilidade disponível no sistema de cogeração pode não ser explorado adequadamente.

O trabalho aqui apresentado busca a minimização do custo operacional da central termoelétrica de uma empresa petroquímica de primeira geração concebida dentro do conceito de cogeração. Neste Sistema há uma interação complexa entre consumos e gerações internas de vapor ou energia elétrica e envolvendo importação de eletricidade, dificultando a tomada de decisão rápida a respeito da melhor configuração para as diversas situações às quais o sistema é submetido. Apesar do modelo de concepção baseado em cogeração, percebe-se durante a operação normal das unidades produtivas diversas condições indicando potencial de melhoria em termos da utilização das flexibilidades de cogeração:

- ❑ Utilização de válvulas redutoras de pressão, dispositivos para completar demanda de vapor e que representam pontos de geração de entropia;
- ❑ Considerável geração de energia através de uso de estágios de condensação, havendo dissipação de energia para o meio ambiente;
- ❑ Abertura em válvulas de controle de alívio de vapor em cerca de 15% do tempo. Estes válvulas são dispositivos que removem o excesso de vapor de coletores a partir de sua expulsão para atmosfera;

Hoje, na empresa, os custos variáveis associados a insumos energéticos representam o segundo maior impacto nas despesas, atrás apenas da matéria prima.

Todavia, há flexibilidade na seleção de fontes energéticas e dependendo dos custos envolvidos, há que se escolher entre operar equipamentos acionados a vapor ou eletricidade, e ainda, selecionar geração interna ou importação. Esta tomada de decisão não é trivial e só pode ser realizada de forma ágil o suficiente, permitindo o gerenciamento do sistema a cada período de variação, se contar com ferramenta computacional que permita, de forma conveniente, coletar e processar informações com precisão adequada.

Por fim, a possibilidade de se melhorar o uso do sistema de cogeração, levando a economias em termos de insumos energéticos, no caso combustíveis, também permite uma redução em termos de emissões ambientais e captação de recursos naturais, como água.

Mais especificamente, o trabalho tem os seguintes objetivos:

- Verificação do potencial de minimização de custo relacionado à geração de energia elétrica e vapor da central petroquímica, em diferentes condições operacionais;
- Geração de uma ferramenta que possibilite a análise do balanço do sistema de vapor de forma rápida e aplicável a diferentes situações em estados estacionários do sistema termoeletrico;
- Geração de ferramenta que permita avaliar e indicar eventuais alterações necessárias para que o sistema atinja a cada estado a condição ótima do ponto de vista do custo variável mínimo da central termoeletrica;

A estrutura de apresentação deste trabalho consiste de uma revisão bibliográfica sobre fundamentos teóricos, metodologia de trabalho, resultados e discussões e, finalmente, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma indústria petroquímica geralmente é composta por dois tipos de plantas: unidades de processo e unidade de utilidades. Unidades de processo convertem matérias-primas em produtos, consumindo utilidades, essencialmente vapor e eletricidade. Uma unidade de utilidades, por sua vez consome combustíveis e água para gerar utilidades. Há necessidade de manutenção contínua de um balanço equilibrado entre o suprimento de utilidades e as plantas de processo e qualquer modificação ocorrida como a introdução de uma nova unidade produtora deve ser acompanhada por ajustes para sustentar o balanceamento. Geralmente para obter a melhor opção para a manutenção do balanço, engenheiros e operadores confiam principalmente em sua experiência ou aplicam algumas rotinas simples de cálculo de balanço material e energético. Devido à complexidade do *site* petroquímico, esta abordagem consome tempo e facilmente desperdiça boas oportunidades (Hirata et al, 2003).

#### 2.1 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Há hoje, no mercado, disponibilidade de softwares baseados em planilhas matemáticas que usam modelos rigorosos de unidades de geração de utilidades. Eles permitem acesso rápido a banco de dados de propriedades de vapor e água e aplicam modelos de equipamentos principais como caldeiras, turbinas e desaeradores. Estes permitem avaliar projetos em potencial, condições e tendências de produção futuras. Simulam o sistema e o efeito de qualquer mudança, reportando o custo real em conjunto com outros fatores relevantes como emissões atmosféricas e o custo real do vapor em cada nível de pressão. Todavia, enquanto estes permitem uma investigação do impacto

de várias mudanças, eles não retornam automaticamente ao usuário a melhor maneira de operar o sistema (Eastwood & Bealing, 2003).

Há também métodos heurísticos que fornecem regras gerais e instruções focadas na otimização do uso de energia. São reportados trabalhos buscando a redução da energia consumida em ciclos térmicos e levantamento da eficiência do sistema (Nishio et al, 1982), ambos com uso de análise termodinâmica. Linhoff et al. (1982) utilizaram tecnologia Pinch, metodologia visando projeto de processos integrados, com recuperação de calor em redes de permutadores de calor. Envolvendo a identificação dos gargalos de recuperação de energia (ou '*pinch*'), permitem a predição do reaproveitamento de calor e redução dos consumos de utilidades, com o desenvolvimento de um método de síntese para custo mínimo (investimento e operacional). Assim, são identificadas as melhores opções de projeto, utilizando ferramentas de análise rápidas e confiáveis. A Tecnologia *Pinch* foi após estendida para o conceito de Análise Energética Global (Total Site), que incorpora uma série de processos atendidos e ligados por uma central de utilidades (Dhole et Linhoff, 1993). Dentro deste conceito, perfis energéticos que consistem na representação gráfica da interface processo e utilidades permitem ao projetista especificar metas para consumo de vapor, consumo de refrigeração, consumo de combustível, geração de trabalho e emissão de poluentes.

Mavromatis et Kokossis (1998) desenvolveram metodologia para análise e otimização de redes de turbinas de vapor, a partir de conjunto de regras lógicas e de conhecimento dos sistemas estudados. Este procedimento integrado com perfis energéticos proporciona uma fotografia completa do conjunto formado por processo e utilidades, com considerações simultâneas de metas termodinâmicas e restrições de equipamentos. A nova metodologia foi baseada nas relações de Willans, que relacionam as vazões de vapor extraído e/ou exausto da turbina simples ou de extração-contrapressão com a sua potência gerada. A partir das linhas de Willans é possível construir diagramas de capacidade de cada máquina, envolvendo seus limites e

eficiências. O método desenvolvido representa a região de operabilidade do sistema de turbinas e também permite otimizar sua operação.

Recentemente os conceitos de Análise Energética Global foram aliados a uma abordagem exergetica a eficiência de turbinas para avaliação de um complexo petroquímico brasileiro (Pires e Zemp, 2004). Os perfis térmicos, assim como metas de consumo de vapor, refrigeração, combustíveis e trabalho foram definidos. A partir daí foram avaliados casos de paradas de unidades, modificações de processo, entrada em operação de nova unidade e mudança de temperatura de uma utilidade. Foi constatada a conveniência do estudo na apresentação do perfil energético do complexo, em otimização do consumo energético total na fase de projeto e na análise de impacto de mudanças operacionais, com uma visão integrada das unidades de processo e utilidades.

Por outro lado, métodos de programação matemática, são baseados na formulação de problemas por um modelo matemático, que é resolvido através de técnicas apropriadas de otimização. O projeto de redes de utilidades com demandas fixas de energia elétrica, trabalho e diversas pressões de vapor já foi estudado através da aplicação de programação linear mista, sendo o lay-out ótimo parte de uma superestrutura que relaciona potenciais configurações com o modelo inteiro misto (Papoulias e Grossmann, 1983). Minimização da perda de potência foi avaliada através de método de programação dinâmica, buscando pressões ótimas de vapor, distribuição de turbinas e das vazões de vapor entre todos os dispositivos (Petroulas e Reklaitis, 1984).

Pinto (1995) apresentou uma tentativa de modelagem do sistema termoeletrico de uma indústria petroquímica brasileira, de forma integrada a software de aquisição de dados on-line. Utilizando esta base de dados são aplicadas rotinas de otimização determinando a melhor distribuição de carga entre equipamentos e dos combustíveis a serem utilizados, buscando minimizar os custos operacionais e atendendo às restrições impostas a cada equipamento. Tal sistema de otimização foi desenvolvido para ser utilizado como ferramenta gerencial, orientando as decisões relativas à operação dos

geradores de vapor, turbogeradores e principais equipamentos auxiliares. O modelo matemático foi desenvolvido basicamente a partir das equações linearizadas de balanço material e energético de cada equipamento, aplicadas dentro do domínio formado pelas restrições operacionais e com as informações relativas a demandas de energia elétrica e vapor e custos dos insumos energéticos. A técnica de otimização empregada foi programação linear inteira mista (MILP). Os principais problemas encontrados, porém, residem na inconsistência da base de dados e envolveram os seguintes aspectos:

- o fechamento de balanço não foi possível devido a erros em medições de vazão, incluindo a falha de alguns elementos primários;
- os balanços relativos aos turbogeradores foram montados exclusivamente a partir de curvas de desempenho destes equipamentos fornecidas pelo fabricante, sem que houvesse avaliação do desgaste decorrido pelo envelhecimento natural dos equipamentos, sendo constatado nos testes desvio das condições de operação em relação à curva original, impedindo a obtenção de um balanço de massa e energia consistente.

Bojic e Stojanovic (1996) aplicaram rotina de otimização via programação linear inteira mista para minimizar as perdas energéticas de uma fábrica contendo um pequeno sistema de calor (necessidades de aquecimento) e potência, consistindo de uma caldeira, uma turbina de contrapressão e dois níveis de pressão de vapor, sendo que tanto energia elétrica quanto vapor poderiam ser gerados internamente ou importados. A necessidade da aplicação de variável binária é justificada pela consideração de turbina operando ou fora de operação. Como resultado, foi possível construir diagramas com a composição de consumo de energia, para os casos de geração de vapor e energia elétrica internas, de geração apenas de vapor para consumo de calor e de caldeira fora de operação. Para cada caso foram relacionados os custos para aquecimento e energia elétrica, sendo que os diagramas apresentaram cada caso como uma região onde é explicitado o consumo ótimo de energia. Observou-se uma economia máxima de 65,6% factível se o sistema operasse de forma otimizada. Tendo em vista a configuração em questão, a fábrica pode

ser operada baseando-se apenas nos diagramas construídos a partir da rotina de otimização, sem necessidade de aplicação de software em tempo real.

Neste mesmo ano, Papalexandri et al. propuseram aplicação de técnicas de modelagem e otimização sob incertezas para explorar situações de um sistema de vapor industrial com demandas variáveis, composto por três níveis de pressão de vapor, dois fornos e uma turbina de extração-contrapressão. Um modelo matemático da rede foi desenvolvido, baseado em medições e aplicando técnicas de reconciliação de dados, utilizando softwares comerciais. Com uma função objetivo baseada em compras e vendas de vapor e energia elétrica, foram verificadas otimizações em situações envolvendo 1 e 2 períodos, variando o compromisso da geração de vapor entre os fornos e venda de vapor e o equilíbrio entre geração de energia elétrica e vapor no turbogerador com a compra ou venda de energia elétrica. Um terceiro caso foi avaliado considerando a saída de manutenção de um forno e assim envolvendo variáveis binárias – o caso foi resolvido aplicando-se rotina de otimização específica para o problema MILP com modelo multiperíodo através da linguagem GAMS, também disponível comercialmente. Finalmente, um quarto caso lidou com incertezas atribuídas à eficiência de bombas e mesmo assim observou-se que o sistema de vapor pode ser rentável.

A aplicação de pacotes de softwares comerciais também é reportada por Milosevic (1997), aplicada a sistemas de vapor de grande complexidade (refinaria), com a construção de modelo rigoroso envolvendo caldeiras, turbinas, vasos de flash, dessuperaquecedores e desaeradores. As informações são introduzidas manualmente, apesar de estarem rapidamente disponíveis devido ao sistema de aquisição “*on-line*”. O modelo considera:

- relações entre eficiência de turbinas e sua carga;
- relações da qualidade do vapor com a carga de turbinas e desaeradores;
- perfil de temperatura ao longo das tubulações;
- cálculo do preço de cada nível de vapor, baseado nos custos de combustíveis e nos créditos devido à produção de trabalho nas turbinas.

O pacote de otimização, por sua vez executa quatro funções principais: modelagem de turbinas, balanço básico do sistema de vapor, cálculo do custo de operação e otimização da rede. Este software, baseado em plataforma de planilha comercial (EXCEL), resgata do modelo informações essenciais e trabalha apenas com as variáveis e equipamentos que podem ser manipulados (como caldeiras, importação de vapor e turbinas de extração-contrapressão e extração-condensação) visando a minimização de custo. Foram observados ganhos de cerca de US\$ 2.750.000,00 por ano e benefícios adicionais, como ferramenta de treinamento de operadores.

Em 2003, Hirata et al. exploraram as oportunidades relacionadas à capacidade (capacidade mais habilidade) dos sistemas de utilidades de duas plantas petroquímicas após fusão das indústrias, em 1994, e cujos sistemas de vapor e energia elétrica foram interligados. Assim, foi formulado um modelo das plantas para estudo situacional ou planejamento de produção, baseado nos balanços de energia e massa e envolvendo restrições como demandas sazonais e contratos de combustível e eletricidade. Segundo Hirata et al., como planejamento de produção pode suportar tolerâncias razoáveis de precisão, o modelo pode adotar equacionamento linear para resolver problemas de escala industrial suficiente e eficientemente. A aplicação de modelos não lineares exige grande esforço computacional e geralmente levam a ótimos locais ou falham em prover uma solução. Estas condições desfavoráveis, no entanto podem ser superadas aplicando modelos lineares. Para alguns problemas particulares (como parada de manutenção) é possível empregar variáveis inteiras para selecionar entradas e saídas de operação de equipamentos.

O ambiente do modelo de Hirata et al. (2003) integrou uma interface gráfica, banco de dados (ACCESS) planilhas (EXCEL) e solver via programação matemática (GAMS). As equações de consumo de utilidades incluíram parâmetros que envolvem carga de produção, temperatura ambiente e status de parada ou partida de equipamentos, buscando cobrir um amplo espectro de situações de operação. Dados foram resgatados do histórico da planta, permitindo definição dos parâmetros do modelo através de regressão linear. A função objetivo buscou a minimização dos custos totais de produção

através da variação da operação do sistema de utilidades. O modelo foi desenvolvido em GAMS e solucionado via solver OSL (IBM, 1991). Apesar da planta operar com sistemas de controle avançado (DMC), potenciais para melhoria ainda se mostravam possíveis e de difícil identificação. O modelo permitiu aos engenheiros investigar os seguintes potenciais de melhoria:

- Planejamento de orçamento: Com a aplicação do modelo formulado como multiperíodo, é possível calcular simultaneamente o orçamento de todos os meses, já considerando demandas de situações otimizadas;
- Tomada de decisão em investimentos: o modelo permitiu a avaliação e seleção de nova turbina para geração de cerca de 15 MW. Chegou-se à decisão de instalação de duas turbinas de estágio simples - uma de 13MW, consumindo vapor de baixa pressão e com condensação e uma turbina de cerca de 1 MW consumindo vapor de alta pressão e com condensação. A solução permite uma economia de 6,7% - 1,5 vezes o que seria obtido com uma solução aparentemente interessante de instalação de uma turbina de 15 MW consumindo vapor de alta pressão e com condensação;
- Otimização de contrato de energia elétrica: a importação de energia elétrica no período de manutenção (novembro, turno da noite), que inclui parada de caldeiras e turbinas, foi reduzida quase pela metade, e apesar da necessidade de aumento de queima de combustível, foi possível reduzir os custos de operação em cerca de 4%;
- Agendamento de paradas de manutenção: em períodos de parada, significativas variações nas demandas de insumos, utilidades e pessoas podem ocorrer, aumentando as dificuldades de otimização de agendamentos destes períodos. Nas partidas de plantas, por exemplo, há um consumo muito grande de vapor e pode não ser possível atender a demanda total se todas as plantas estiverem em partida simultaneamente.

O modelo pode atuar auxiliando a decisão a fim de garantir o atendimento dos balanços materiais e energéticos;

- Balanços de água e combustíveis: O consumo de água e de outros combustíveis é otimizado junto com vapor e energia elétrica. Além destes aspectos, a redução dos consumos de água no processo e a seleção entre combustíveis para atender parâmetros ambientais, com o emprego de um modelo, são obtidos de forma mais rápida, fácil e precisa do que depender de experiências ou heurísticas que podem variar entre engenheiros e fornecer resultados diferentes.

Segundo Strouvalis (1998), os métodos heurísticos permitem a seleção de opções e fornecem regras gerais úteis, mas não são sistemáticos. A programação matemática é considerada a abordagem mais robusta de otimização de projeto e operação de sistemas de utilidades. De forma contrária, os métodos heurísticos oferecem pouca compreensão física dos sistemas e podem tornar-se particularmente complexos e de difícil solução quando problemas reais são formulados (Strouvalis et al, 1998).

Resultados da aplicação de modelos de otimização baseados em programação matemática durante as operações diárias de uma unidade de produção de utilidades podem fornecer ganhos consistentes de 2 a 5% do custo desta unidade da planta sem necessidade de investimento, de acordo com Eastwood e Bealing (2003).

As análises energéticas são comumente aplicadas para um melhor entendimento das interações processos-utilidades e permitem ganhos econômicos a partir da percepção de potenciais de transferência energética entre correntes de processo, reduzindo a demanda de utilidades, tanto em projetos iniciais quanto em modificações de unidades de processo já existentes. As análises exergéticas, métodos cada vez mais aplicados, permitem detectar-se as maiores fontes de irreversibilidades (perdas) em um determinado processo e orientar para o melhor uso da energia ao longo de todo o processo.

Finalmente, conforme a experiência de Pereira (1995), a maior dificuldade dos programas envolvendo a conservação de energia é a sensibilização das pessoas para o tema, da gerência ao chão de fábrica. A conscientização, assim, é necessária para viabilizar as ações que permitirão efetivamente alterar a maneira de operar o sistema visando uma forma mais otimizada.

## **2.2 TURBINAS E LINHAS DE WILLANS**

De acordo com a saída de vapor, os estágios das turbinas a vapor podem ser classificados em dois tipos genéricos:

- Estágio de contra-pressão, onde a pressão de saída de vapor é maior do que a pressão atmosférica, fornecendo vapor para outros usos;
- Estágio de condensação, nos quais a pressão de saída do fluido de trabalho é menor do que a pressão atmosférica, e o vapor é encaminhado a um condensador.

Estes dois tipos de estágios podem ser combinados em turbinas de forma a atender as necessidades de cada ciclo de cogeração. O arranjo mais simples é a turbina de contra-pressão onde o vapor flui através da máquina e é exaurido da turbina em uma única pressão, relativamente baixa e ainda passível de uso na instalação. Em instalações onde mais de uma classe de vapor é necessária, as maiores pressões são supridas através da “sangria” (extração) da vazão desejada a partir de uma região da turbina com a pressão apropriada, em turbinas de extração-contrapressão (nas quais ambas as saídas de vapor são utilizadas para atender outras necessidades) ou extração-condensação (na qual a saída de vapor de extração atende a outros fins e a saída de condensação é enviada a um condensador, a partir do qual é usual haver reaproveitamento do condensado). Esta “sangria” ou extração, no entanto, penaliza a capacidade de geração de potência. Turbinas de condensação plena maximizam a geração de potência expandindo todo

vapor até determinado nível de pressão e utilizam um condensador, descarregando o fluido de trabalho na forma de condensado. No entanto, é possível incluir nas turbinas de condensação uma seção de extração de vapor para atender às demandas de vapor de pressão inferior (daí o conceito de turbinas de extração-condensação). A demanda de calor de uma instalação torna dependente a geração elétrica em turbinas de contrapressão ou extração-contrapressão, mas uma turbina de extração-condensação libera o gerador desta restrição (A Guide to Cogeneration, 2001).

As equações de performance representam a modelagem das linhas de Willans (Strouvalis & Mavromatis, 1998), que permitem a síntese dos diagramas de capacidade de cada turbina. O equacionamento para o caso de turbinas de estágio simples via linhas de Willans fornece uma relação linear entre a vazão de alimentação de vapor e a potência gerada da turbina representando todos os modos de operação, incluindo a situação de máxima geração de potência utilizando a máxima alimentação de vapor e a situação na qual a turbina não gera potência, mas encontra-se em condição mínima de giro, situação de *stand-by*.

Para turbinas com extração, é possível relacionar linearmente a vazão de alimentação de vapor com a potência gerada e com a vazão de vapor extraída, como segue:

$$M = mE + rS + c \quad (1)$$

Onde,

$$X = M - S$$

M: vazão de alimentação de vapor;

E: potência gerada na turbina;

X: vazão de extração de vapor;

c: constante de *stand-by* - giro mínimo, sem carga;

m: variação da vazão de alimentação, M, com a variação de potência gerada para uma dada vazão de extração, S;

r: variação da vazão de alimentação, M, com a variação da vazão de extração, S, para uma dada potência gerada.

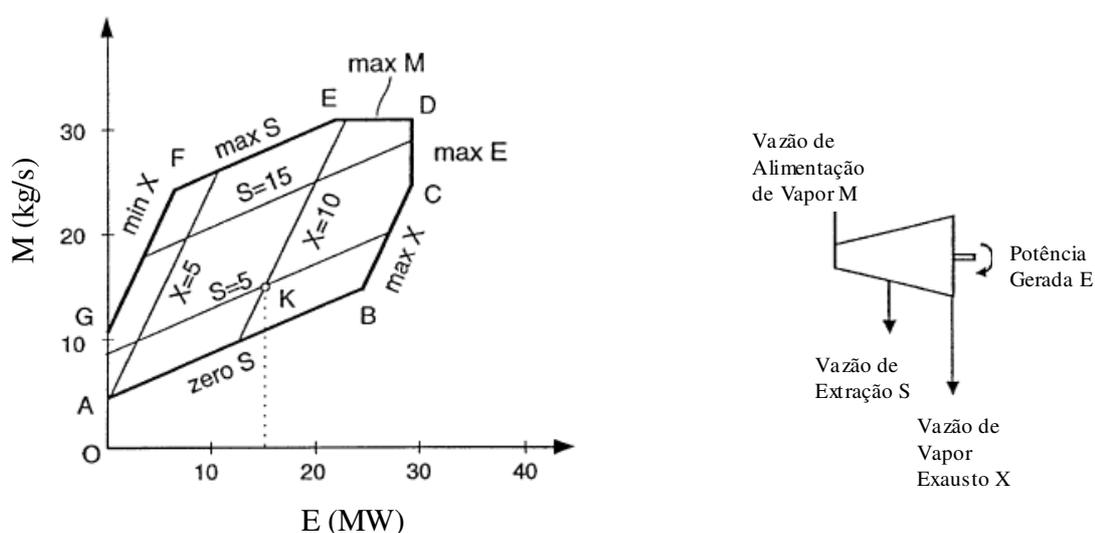


Figura 2: Diagrama de capacidade de uma turbina de duplo estágio.

Os parâmetros 'm' e 'r' são característicos de cada turbina e podem ser diretamente relacionados ao diagrama de capacidade da turbina (Figura 2), válido para condição especificada do fluido de trabalho na alimentação, extração e condensação. O diagrama (ABCDEFG) fornece a vazão de vapor de alimentação versus a potência gerada na turbina para o conjunto de vazões de extração S e vazão de vapor exausto X. Assim, pode ser considerado como um conjunto de linhas de Willans em diferentes vazões de extração e de exausto, confinadas pelas condições limites da turbina.

Desta forma, as linhas ED e CD representam os limites de operação da turbina devido às restrições construtivas relacionadas à máxima alimentação possível de vapor e

máxima potência gerada, respectivamente. As situações de vazão de extração mínima ( $S=0$ ) e máxima são representadas pelas retas AB e FE, respectivamente e as linhas paralelas a elas representam o conjunto de situações onde a vazão de extração é constante. O mesmo comportamento é aplicado para as vazões de exausto, através das retas GF e BC, limites de exaustão mínima e máxima, respectivamente. Assim, como exemplo, verifica-se que o ponto K do diagrama de capacidade acima corresponde a situação de geração de 16 MW de potência e vazão de extração de 5 kg/s, com consumo de 15 kg/s de vapor de alimentação e vazão de exausto de 10 kg/s.

Uma observação importante a respeito desta forma de modelagem de turbinas é que tanto as restrições quanto as curvas de operação mantêm-se lineares dentro da representação adotada. Na prática, os parâmetros 'm' e 'r' geralmente decrescem com aumento da alimentação de vapor. Apesar de ser possível contabilizar estes efeitos através de modelos rigorosos, os desvios da linearidade são pequenos e o diagrama de capacidade baseado no comportamento linear é significativamente preciso. Isto é aceitável principalmente no contexto do propósito do modelo, que é representar a turbina de uma forma explícita, mas precisa, ao contrário de modelos convencionais que assumem eficiências constantes ou lineares, para evitar problemas de não-linearidade em formulações matemáticas (Mavromatis e Kokossis, 1997).

## **2.3 CONTEXTO DO TRABALHO**

Este trabalho insere-se no contexto da programação matemática, abordando diversas das técnicas mencionadas acima, como:

- Integração de modelo da planta parametrizado a partir de dados reais com modelo de otimização em plataforma que permite gerenciamento de problemas em larga escala (GAMS);
- Formulação do modelo de otimização baseado em equações lineares;
- Função objetivo baseada na minimização do custo e restrições baseadas nas limitações reais dos equipamentos;

- Utilização de resgate on-line de informações da planta, para definir os parâmetros do modelo;
- Aplicação em otimizações turno-a-turno, focando o modo de operar e sem necessidade de custos de investimento adicionais.

Além de unificar estas técnicas, consideradas bem sucedidas nas referências citadas, o presente trabalho, no entanto, apresenta também algumas abordagens interessantes, que visam reduzir o trabalho computacional do otimizador. Estas abordagens incluem cálculo dos parâmetros do modelo em cada situação da rede de vapor; foco básico no sistema de vapor e no fornecimento de energia elétrica; rigor na apuração dos consumos de vapor, buscando alta precisão no fechamento do balanço de vapor; identificação e rápida solução de problemas de instrumentação, favorecendo a confiabilidade das informações e a eficácia do modelo.

Novamente é importante lembrar que o indicador a ser otimizado é o custo da central de cogeração, principalmente através das flexibilidades já existentes, mas sem alteração dos estados termodinâmicos. O trabalho não se propõe a executar análise energética ou exergética, e assim não constam no escopo recomendações de alterações que melhorem a eficiência do ciclo energético, apesar de algumas situações estudadas só poderem ser obtidas com algumas alterações.

O trabalho baseou-se em equacionamentos via balanço material e de energia, sendo suficientes para o objetivo de obtenção dos fluxos de vapor e sua distribuição na rede. Balanços exergéticos não foram aplicados neste trabalho, já que o objetivo não era a identificação das fontes de irreversibilidades, cujos maiores contribuintes já são conhecidos. Outra dificuldade da aplicação de balanços exergéticos no trabalho proposto reside no fato de que neste não se aplicam as leis da conservação (há perda de exergia ao longo da rede), causando dificuldade na verificação de precisão das avaliações pelo método empregado.

A conveniência do trabalho também se suporta pelo momento: a Indústria estudada conduz atualmente um programa de otimização de utilidades, envolvendo consultoria externa e buscando a conscientização interna dos diversos setores da empresa em relação aos ganhos consideráveis que podem ser obtidos com a gestão adequada dos sistemas de energia.

## **CAPÍTULO 3**

### **DESCRIÇÃO DO SISTEMA TERMOELÉTRICO ESTUDADO**

Neste capítulo serão abordadas as características relevantes da central termoelétrica estudada para o objetivo, envolvendo aspectos de projeto e condições atuais de processo e controle.

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

As indústrias petroquímicas necessitam, de um modo geral, de vapor para aquecimento e/ ou acionamento para grandes máquinas. No caso da indústria petroquímica estudada (uma central de matérias-primas), optou-se pela centralização da geração de vapor, com vantagens evidentes nos custos de investimento e operacional e na minimização da poluição atmosférica.

Devido à crise de combustível da década de 70 e pelo fato do Rio Grande do Sul possuir consideráveis reservas de carvão mineral, se comparado com outras regiões do Brasil, escolheu-se o carvão como o combustível principal dos geradores de vapor da indústria estudada.

O sistema de geração de vapor da unidade termelétrica foi então dimensionado com três caldeiras de vapor de super alta pressão (VS), operando normalmente apenas duas, ficando a terceira na reserva. Por este motivo, e tendo em vista o alto custo de uma caldeira a carvão em relação a uma de óleo de mesma capacidade (cerca de 3 vezes mais cara, na época), decidiu-se pela instalação de duas caldeiras a carvão e uma a óleo, sendo esta última usada apenas durante as paradas de manutenção das outras.

Os geradores de vapor instalados são, de certa forma especiais, pois além da diversidade de combustíveis a serem queimados, do problema de carvão com alto teor de cinzas, há a necessidade de uma confiabilidade excepcional, que garanta a operação contínua da central de matérias-primas e demais indústrias petroquímicas.

O sistema termelétrico desta empresa é composto pelos Sistemas de Vapor e de Energia Elétrica, que transcendem a definição comum de Unidade, já que envolvem ativos e redes distribuídas por toda extensão da Central de Matéria-Prima, e ultrapassando seus limites para atender as empresas de segunda geração.

Às diversas unidades da empresa são atribuídos números identificadores, que estão presentes na nomenclatura (*tags*) de seus equipamentos. Assim, o sistema termoeletrico formado pela geração de vapor (áreas 6 e 446) e energia elétrica (áreas 7 e 77) e outras áreas da unidade de utilidades, como estação de tratamento de águas (área 442) e torres de resfriamento (áreas 8 e 88) devem complementar as necessidades energéticas das unidades de processo 1 (formada pelas áreas 1, 2, 3 e 4), processo 2 (formada pelas áreas 11, 12, 13, 14, 15, 164), processo 3 (formada pelas áreas 53, 55, 522, 551, 562, 502), além de suprir também correntes de utilidades para as empresas clientes (empresas A, B, C, D, E, F, G, H, I).

As necessidades de energia de uma empresa petroquímica como esta e sua configuração caracterizam sua central termoeletrica como uma instalação de cogeração, basicamente pela sua capacidade de gerar energia térmica e elétrica a partir de seus geradores. Estudos internos recentes mostram que dois terços da demanda total de energia da indústria estudada são necessidades térmicas e a fração restante representa demandas de potência como energia elétrica ou trabalho de eixo.

## 3.2 SISTEMA DE VAPOR

Diferente de uma central termelétrica convencional, o sistema de energia da empresa estudada deve suprir vapor não apenas para geração de energia elétrica, mas também para acionamento de turbomáquinas de grande, médio e pequeno porte, para consumo em processos que envolvem aquecimento, mudança de fase ou separação de correntes, para transporte de correntes e para serviços diversos. Para atender a fins tão variados, a rede de vapor foi subdividida em 4 níveis de pressão: vapor de super alta pressão (VS), vapor de alta pressão (VA), vapor de média pressão (VM) e vapor de baixa pressão (VB), respectivamente com pressões de  $112 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ,  $42 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ,  $18 \text{ kgf.cm}^{-2}$  e  $4,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$  e temperaturas de, respectivamente,  $525 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $315 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $225 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Cada nível é constituído por diversas tubulações que formam uma rede ao redor das áreas da presente indústria, recebendo vapor das fontes e suprindo as saídas. Vapor de superalta pressão é o vapor efetivamente produzido a partir de água e é gerado nos fornos de craqueamento (pirólise) das unidades de processo 1 e 2 e nas caldeiras de utilidades. Os níveis de VA, VM e VB, além de atendimento do consumo interno da empresa também são exportados para as empresas de segunda geração. As caldeiras e fornos já mencionados geram exclusivamente vapor de super alta pressão, mas os níveis inferiores são gerados a partir da(s) saída(s) de turbinas de extração controlada, de turbinas de contrapressão ou de estações redutoras de pressão. Estas turbinas devem atender primordialmente as potências necessárias no processo e energia elétrica da empresa estudada. Para compatibilizar o suprimento de vapor com a demanda, há necessidade de equipamentos voltados especificamente para garantir as necessidades de vapor de cada coletor (tubulações principais de vapor, que se originam na unidade de utilidades, atravessam tubovias e unidades de processo e delas derivam os ramais de suprimento para os equipamentos consumidores), complementando a atuação das diversas turbinas. Estes equipamentos são as estações redutoras de pressão, localizadas entre os quatro coletores.

As estações redutoras são formadas por válvulas que recebem uma determinada vazão de vapor do coletor superior e rebaixam a pressão do vapor na saída para atender as condições do coletor inferior. Após esta redução, há também um conjunto de válvulas que injetam, de forma controlada, água de alimentação de caldeira no vapor rebaixado, de forma a reduzir também a temperatura até a especificação do coletor inferior. É importante observar que esta vazão injetada constitui-se em parte da geração de vapor do coletor, aumentando a vazão de saída.

A Figura 3 representa o volume de controle analisado neste trabalho para o sistema de vapor da indústria estudada, abrangendo as Unidades Operacionais e as saídas de vapor para as empresas clientes, chamadas de empresas coligadas. Seus subsistemas mais importantes também estão representados, como explicado a seguir.

As tubulações pelas quais as vazões de vapor escoam estão simbolizados pelas barras e linhas coloridas. Equipamentos que possuem variáveis consideradas manipuláveis no presente estudo estão apresentados individualmente, como é o caso das turbinas dos compressores de processo (2TBC1/21, 4TBC1/2, 22TBC1), as turbinas dos geradores elétricos (7TBG1/2), válvulas redutoras de pressão, válvulas de alívio controlado de vapor e equipamentos que possuem motores e turbinas como acionadores e estes podem ser alterados durante a operação.

Equipamentos ou unidades que se apresentam como pontos fixos de vazão de vapor foram agrupados em conjuntos com características comuns da especificação de entrada e saída de vapor, como é o caso das turbinas VA/VB (entrada de VA e saída de VB), VS/VB, VA/VM, VM/VB ou saídas em definitivo do volume de controle da rede de vapor, como VSFX (saídas definitivas de vapor do coletor de VS), VAFX, VMFX, VBFX. As entradas de vapor em coletores a partir da separação em vasos de flash também são entradas fixas. As saídas de vapor para os condensadores das turbinas de extração-condensação são consideradas variáveis, apesar de serem dependentes da potência gerada e vazão de extração e rotação das turbinas. A seguir são apresentadas

algumas definições relativas aos equipamentos integrantes do sistema quanto a suas funções:

1. Fontes: são os equipamentos responsáveis pelas entradas de vapor dos quatro níveis existentes, fontes de energia elétrica e fontes de condensado, podendo tratar-se de entradas fixas ou manipuláveis. É possível que alguns equipamentos que alimentam vapor no sistema também sejam consumidores (ou seja, impõem correntes de saída de vapor da rede). Assim,

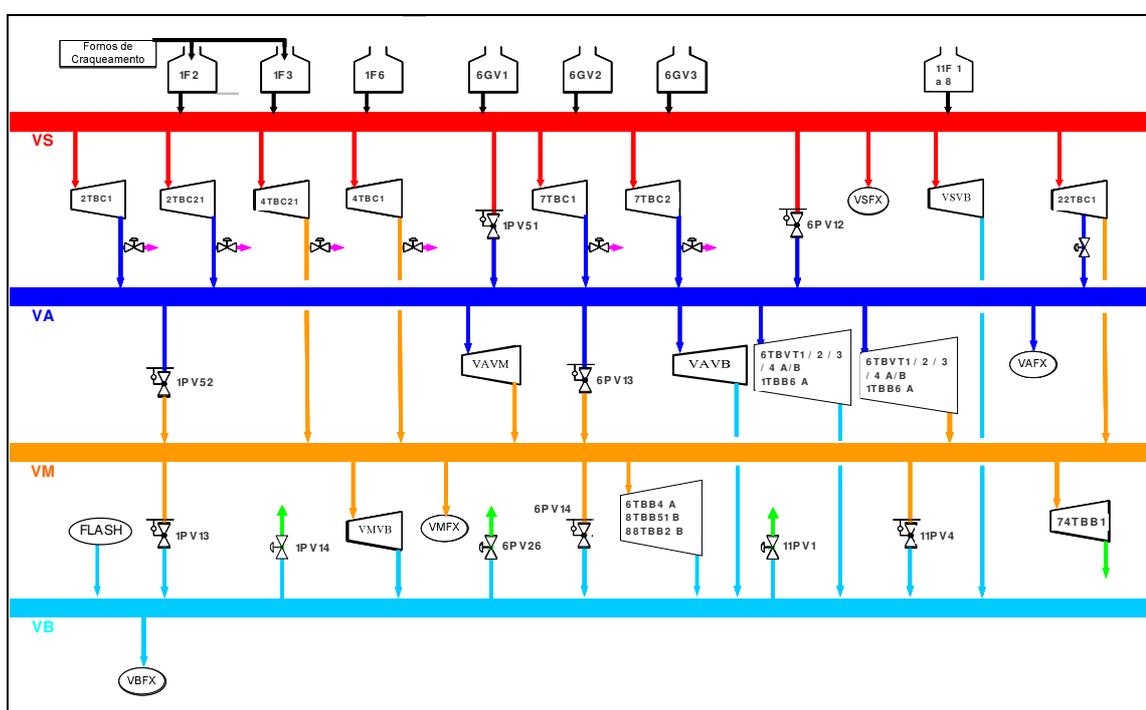


Figura 3: Volume de controle estudado da rede de vapor.

- VS é produzido por fornos de 14 fornos pirólise da planta de processo 1 (13 geram VS saturado que ainda precisa ser superaquecido nos 1F2 e 1F3; o 1F6 por sua vez já gera VS superaquecido) e 8 fornos de pirólise da planta de processo 2 11F1 a 11F8 (que geram VS superaquecido sem precisar de fornos superaquecedores adicionais) que representam entradas fixas, dependente exclusivamente da carga de processo. A produção de

VS é complementada por caldeiras de utilidades (entrada manipulável, variando para completar a demanda). Os fornos de processo só queimam gás residual de processo, ao passo que a geração em utilidades pode ser feita a partir da combustão de carvão mineral, óleo e gás.

- VA é gerado por equipamentos que são saídas variáveis como algumas turbinas (7TBG1/2 e 22TBC1) e válvulas redutoras (1PV51 e 6PV12) e por equipamentos considerados saídas fixas de VA neste trabalho, as turbinas 2TBC1/21. Todas estas fontes, por outro lado, também são saídas de VS do coletor;
  - VM pode ser gerado por equipamentos que são saídas variáveis como turbinas (4TBC1/2, 22TBC1) e válvulas (1PV52 e 6PV13) ou por equipamentos considerados saídas fixas de VM (4TBC2/22, 8TBB1 B/C/D, etc.);
  - VB pode ser gerado por equipamentos de balanço como turbinas (6TBB4 A, 8TBB51 B) e por válvulas redutoras (1PV13 e 6PV14) ou por produtores fixos (2TBB11, 44TBC1);
  - Energia elétrica pode ser gerada na turbina a gás (77TBG01), nos turbogeradores a vapor (7TG1/2) ou importada da rede externa, todos considerados geradores cuja energia elétrica é manipulável, limitada apenas pelas restrições existentes.
  - Condensados de vapor podem ser gerados através de turbinas de duplo estágio com condensadores de superfície (7TBG1/2, 2TBC1/21, 4TBC1/21) ou através de permutadores de calor que utilizam o calor latente dos diversos níveis de vapor consumidos (6P01, 1P21, etc.)
2. Saídas de vapor ou energia elétrica: representam as demandas de energia elétrica e vapor dos quatro níveis de vapor, que podem ser classificadas da seguinte forma:

- demandas térmicas: aquecimento ou mudança de estado de um fluido de processo ou utilidades com vapor em saídas fixas. O vapor sai definitivamente da rede (com exceção da parcela recuperada em vasos de *flash*) e geralmente também é fonte de condensado;
  - demandas de Processo: saídas fixas de vapor, que participa em processos de separação ou de movimentação de correntes (como aplicações em *strippers* ou ejetores). O vapor sai definitivamente da rede;
  - demandas de Potência: representam pontos de saída de energia elétrica e trabalho de eixo dos sistemas, podendo ser fixos ou manipuláveis.
3. Alívios controlados de vapor: os alívios do coletor de vapor de baixa pressão (VB) permitem controlar a quantidade de vapor expulso para a atmosfera de acordo com a pressão do vapor na tubulação onde está instalado. Geralmente sua abertura está relacionada à manutenção do vapor abaixo de dada pressão, mas sua atuação é considerada desperdício de energia. Não devem ser confundidos com válvulas de segurança, de atuação mecânica, sendo este o último nível de proteção da rede de vapor;
  4. Válvulas redutoras de pressão: são ao mesmo tempo dispositivos de entradas e saídas de vapor de subsistema. Existem aos pares entre cada coletor de vapor, salvo entre os coletores de VM e VB, onde existem três. A manipulação destas válvulas também é permitida ao otimizador de forma a buscar o menor custo. Sua abertura está associada a uma perda de exergia, apesar de ser necessária em alguns casos para atender a demanda dos coletores inferiores;
  5. Clientes externos: são as empresas vizinhas à Petroquímica de Primeira Geração e que importam matéria-prima e/ou utilidades (incluindo vapor em diversos níveis) produzidos na Indústria estudada. São considerados saídas fixas e definitivas de vapor da rede, não sendo geradoras de outros níveis de vapor ou de condensados;

6. Turbinas de extração-condensação: apesar da Indústria estudada possuir seis máquinas que se enquadram nesta classificação, apenas nas turbinas dos turbogeradores de energia elétrica da Unidade de Utilidades (7TBG1 e 7TBG2) e as turbinas dos compressores de propeno refrigerante da Planta de Processo 1 (4TBC1 e 4TBC21) há presença de variáveis manipuláveis. As turbinas dos compressores de gás craqueado da Planta de Processo 1 hoje trabalham no limite de sua capacidade e na prática não sofrem ajustes nas suas vazões de vapor, salvo no caso de alterações na carga de produção – assim, com esta restrição prática serão considerados equipamentos fixos;
7. Turbinas de extração-contrapressão: existe apenas uma máquina a ser enquadrada desta forma na Indústria estudada, a que aciona o compressor de gás craqueado da planta de Processo 2 (22TBC1), que também é um equipamento manipulável e dada determinadas potência e rotação (exigência do processo), tem-se o consumo de VS em função da extração pretendida (ou seja, é possível manipular-se a vazão de VA);
8. Acionadores cambiáveis: por força de continuidade operacional e confiabilidade, muitos equipamentos de pequeno a médio porte como bombas, ventiladores e compressores possuem equipamentos reserva e equipamentos com acionamento via turbinas a vapor, além dos motores elétricos. A presença de reservas permite a saída de equipamentos para manutenção sem redução de produção, assim como a presença de acionadores diferentes permite mitigar as conseqüências de emergências causadas por queda de energia elétrica, por exemplo. A proposta deste trabalho inclui verificar, dentro de um grupo de equipamentos, qual acionador é mais adequado para operar de forma a minimizar o custo da central termoelétrica. Foram considerados equipamentos com acionadores selecionáveis essencialmente bombas, compressores e ventiladores com reservas na Unidade de Utilidades e um conjunto de bombas da unidade de Processo 1. Na prática, as Unidades de Processo 1 e 2 também possuem uma grande quantidade de acionadores que se encaixam neste conceito. No entanto, também há aspectos de confiabilidade e de premissas operacionais que em curto prazo podem impor

barreiras à implementação prática dos resultados da otimização. Por exemplo, há uma prática operacional de utilizar equipamentos turbinados, com motores elétricos na reserva, já que estes assumem carga mais rapidamente do que turbinas a vapor. Além disso, as áreas operacionais preferem manter uma mesma configuração de equipamentos operando por longos períodos, a fim de não introduzir oscilações no processo. Na unidade de utilidades, no entanto, a troca de equipamentos para melhorar o balanço de vapor já é uma prática adotada sendo este o motivo pelo qual este trabalho concentra os esforços na seleção de equipamentos nesta unidade. Todavia, com a compreensão dos benefícios de uma otimização plena, envolvendo todos equipamentos cambiáveis, ao longo do tempo será natural introduzir outros casos ao modelo.

Vapor de super alta pressão ( $525\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $112\text{ kgf.cm}^{-2}\text{ g}$ ) é gerado em fornos de pirólise de nafta nas plantas das unidades de Processo 1 e 2 e nas caldeiras da Unidade de Utilidades. Na Planta de Processo 1, vapor é gerado a partir da energia residual dos gases craqueados no fornos petroquímicos (total de catorze fornos), resfriando estes gases e ao mesmo tempo produzindo cerca de  $550\text{ t.h}^{-1}$  de vapor saturado, cuja temperatura final é especificada nos fornos superaquecedores da Unidade de Processo 1 (total de dois fornos). Na planta de Processo 2 também há geração de vapor em sete fornos que incluem superaquecedores em seu projeto, gerando assim cerca de  $270\text{ t.h}^{-1}$  de vapor de super alta pressão. O oitavo forno foi construído ao longo do ano de 2005, entrando em operação em 2006, com o objetivo de maximizar a capacidade instalada da Planta de Processo 2. As caldeiras auxiliares completam a demanda de vapor do Pólo Petroquímico, atualmente em torno de  $380\text{ t.h}^{-1}$ . As caldeiras, assim, são os únicos geradores de vapor da empresa que podem controlar a produção de vapor.

No item 4.1 será explicado mais detalhadamente como foi realizada a coleta de dados para formação da planilha de cálculos da rede de vapor a partir dos diversos níveis de informações disponíveis na empresa, assim como o tratamento destes dados de forma a gerar as informações necessárias para alimentação do modelo para otimização da central termoeletrica.

A seguir é feita uma descrição geral sobre os 4 coletores de vapor.

### **3.2.1 Sistema de Vapor de Super Alta Pressão (VS):**

O VS é gerado pelos fornos das plantas de Processo 1 e 2 e pelas caldeiras da Unidade de Utilidades. O VS gerado nas caldeiras de Utilidades é enviado a dois coletores de vapor (cada caldeira a carvão alimenta somente um dos coletores de VS) que se interligam com os coletores de VS das plantas de Processo 1 e 2.

A pressão do coletor de VS é controlada atualmente em  $113 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , aumentando ou reduzindo a produção de vazão de vapor das caldeiras (não há controle na vazão de vapor gerado nos fornos de Processo 1 e 2 por ser dependente das cargas de processo). O controle de temperatura de VS é feito nos dessuperaquecedores dos geradores mantendo-a em  $525^{\circ}\text{C}$ .

Os coletores de VS, localizados na área da Unidade de Utilidades também possuem válvulas de alívio de vapor, expelindo o vapor para atmosfera através de abertura controlada, evitando que a pressão alcance valores superiores a  $115 \text{ kgf.cm}^{-2}$ . A proteção mecânica final das linhas é feita por válvulas de segurança, que abrem em  $130 \text{ kgf.cm}^{-2}$ .

O VS é utilizado em:

- acionamento dos dois turbogeradores elétricos (7TBG1/2) na Unidade de Utilidades;
- acionamento dos dois compressores de gás craqueado (2TBC1/21) e dos dois compressores de propeno refrigerante (4TBC1/21) na planta de Processo 1;
- acionamento do compressor de gás craqueado (22TBC1) e dos dois compressores de eteno (44TBC1/2);

- alimentação de válvulas redutoras de pressão da Unidade de Utilidades (6PV12) e da planta de Processo 1 (1PV51) e alguns poucos consumos térmicos em permutadores da Unidade de Processo 3;

### **3.2.2 Sistema de Vapor de Alta Pressão (VA):**

O VA é produzido nas plantas de Processo 1 e 2 pela extração das turbinas dos compressores de gás craqueado (2TBC1/21 na unidade de Processo 1 e 22TBC1 na unidade de Processo 2) ou pela válvula redutora de pressão (1PV51). Na Unidade de Utilidades o VA é produzido pela extração das turbinas dos turbogeradores 7TBG1/2 ou pela válvula redutora 6PV12.

O controle da pressão de VA é realizado pelo controlador principal de VA, localizado no painel do SDCD da Unidade de Utilidades, que atua primeiramente na extração de um dos turbogeradores previamente selecionado. Quando a extração dos turbogeradores atingir seu valor máximo ajustado, o controlador atua na válvula redutora de pressão previamente selecionada (6PV12 ou 1PV51). A pressão de VA é controlada normalmente em  $41,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$ . O controle de temperatura busca o valor de  $400^{\circ}\text{C}$ . Os alarmes de temperatura baixa e alta atuam em  $360^{\circ}\text{C}$  e  $440^{\circ}\text{C}$  respectivamente.

Caso ocorra pressão alta de VA nos coletores da unidade de Utilidades (acima de  $42,0 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ), haverá abertura controlada da válvula redutora 6PV13, que reduzirá VA para pressão de VM. Na planta de Processo 1 a pressão de VA é controlada de forma semelhante, atuando-se na válvula redutora 1PV52 (no caso de pressão acima de  $44,0 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ), também reduzindo VA para VM. As saídas relevantes de VA incluem:

- turbinas acionadoras dos ventiladores das três caldeiras de Utilidades;
- turbinas acionadoras de bombas de água de resfriamento;
- indústrias de segunda-geração;

- turbinas acionadoras de bombas de óleo e água de processo e compressores de eteno da Planta de Processo 1;
- turbinas acionadoras de bombas de óleo e água de processo e bombas de matéria prima da Unidade de Processo 2;
- válvulas redutoras de pressão da Unidade de Utilidades (6PV13) e da Unidade de Processo 1 e 2, unidade de Processo 1 (1PV52) e consumos térmicos em permutadores da Unidade de Processo 1 e 2 e 3.

### 3.2.3 Sistema de Vapor de Média Pressão (VM)

O VM é produzido pela extração das turbinas dos compressores 4TBC1/21 e dos compressores 4TBC2/22 da planta de Processo 1; pela saída do segundo estágio do compressor 22TBC1 da Unidade de Processo 2; pelas turbinas dos ventiladores das caldeiras em Utilidades e por algumas outras turbinas da unidade de Processo 1 acionadas por VA a que tem seu vapor exausto ligado ao coletor de VM.

Além das turbinas, estão incluídas na geração de VM as válvulas redutoras VA/VM 6PV13 (Utilidades) e 1PV52 (Processo 1).

O controle de pressão de VM é realizado preferencialmente em Utilidades, atuando-se através da válvula redutora 6PV13 quando a pressão de VM cai abaixo de 17,3 kgf.cm<sup>-2</sup> ou atuando-se na redutora 6PV14 (VM/VB) quando a pressão do VM estiver acima de 17,5 kgf.cm<sup>-2</sup>. Os alarmes de pressão baixa e alta de VM ocorrem em 16 kgf.cm<sup>-2</sup> e 19 kgf.cm<sup>-2</sup>, respectivamente.

Há controle da temperatura após a válvula redutora 6PV13 em 315°C, com alarmes de temperatura baixa em 280°C e temperatura alta em 350°C. Na unidade de Processo 1, controle similar é realizado após a 1PV52, com os mesmos valores. As saídas relevantes de VM incluem:

- turbinas de bombas de condensado em Utilidades e unidade de Processo 1, e bombas de água desmineralizada (AD) para os vasos desaeradores, em Utilidades;
- indústrias de segunda-geração;
- turbinas de bombas de água de mancal e turbina de bomba de combate a incêndio;
- turbinas de bombas de matéria prima, água de processo e óleo de lubrificação de grandes compressores da unidade de Processo 1;
- reposição de vapor de diluição dos fornos de ambas as plantas de Processo 1 e 2;
- válvulas redutoras de pressão em Utilidades (6PV14) e em Processo 1 e 2, unidade de Processo 1 (1PV13), unidade de Processo 2 (10PV4);
- consumos térmicos em permutadores da Unidade de Processo 1 e 2, Processo 3 e Utilidades;

#### **3.2.4 Sistema de Vapor de Baixa Pressão (VB)**

Os coletores de VB são basicamente supridos pela extração de turbinas VA/VB ou VM/VB, sendo que as turbinas dos compressores 44TBC1/2 são os maiores produtores de VB. O sistema também é dotado de três válvulas redutoras de pressão de VM para VB (VM/VB): 6PV14 em Utilidades, a 1PV13 em Processo 1 e a 10PV04 em Processo 2.

O controle de pressão de VB é feito a partir da pressão em Utilidades e em Processo 2. Em Utilidades, o controle de pressão de VB atua na 6PV14 e 1PV13, reduzindo VM para VB no caso de pressão de VB menor do que  $4,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , ou atua nas válvulas de alívio de VB (6PV26A/B e 1PV14A/B) no caso de ocorrência de pressão de VB maior do que  $4,7 \text{ kgf.cm}^{-2}$ . Na unidade de Processo 2 o controle é realizado independentemente ao da unidade de Utilidades, atuando nas válvulas redutoras

10PV4A/B, reduzindo VM para VB e, no caso de pressão alta de VB, nas válvulas de alívio 10PV1A/B, que descarregam VB para a atmosfera. Os alarmes de pressão baixa e alta de VB ocorrem em  $3,0 \text{ kgf.cm}^{-2}$  e  $6,0 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , respectivamente.

Há controle da temperatura após a redutora 6PV14 em  $225^{\circ}\text{C}$ , com alarmes de temperatura baixa em  $190^{\circ}\text{C}$  e temperatura alta em  $245^{\circ}\text{C}$ . VB é utilizado basicamente para aquecimentos em permutadores de calor nas unidades de processo (Processo 1 e 2 e Processo 3) e utilidades da central de matérias-primas. Também há atualmente exportação de vapor de baixa pressão para apenas uma indústria de segunda geração.

Observa-se que a geração de vapor se dá apenas no nível de super alta pressão, sendo as demais classes geradas após realização de trabalho em diversos equipamentos ou pela atuação de válvulas redutoras. Em alguns equipamentos de porte médio, é comum haver reservas, ou seja, um número total de equipamentos de mesma função maior do que o número necessário para operação – isto é fundamental para continuidade operacional, permitindo a rápida substituição de dado equipamento no caso de manutenção. O acionador típico de equipamentos de médio e pequeno porte é o motor elétrico, mas é uma prática em projetos prever acionamento com turbinas para alguns equipamentos, para aumentar a confiabilidade das instalações em caso de emergências relacionadas ao fornecimento de energia elétrica. Na prática, a decisão de operação contínua fica a cargo dos equipamentos turbinados, preferindo que os reservas sejam máquinas motorizadas. Isto é explicado pelo fato de que, na queda de um dos acionadores titulares, um motor elétrico tem um tempo de partida mais curto do que uma turbina.

Também é importante ressaltar a diferença fundamental entre os dois tipos de entradas de VS da Indústria estudada: fornos petroquímicos e caldeiras. A geração de vapor nos fornos é dependente do processo, não podendo ser manipulada pelos operadores sem afetar a produção de produtos petroquímicos. As caldeiras, por sua vez, podem variar sua carga para completar as necessidades de vapor da Indústria estudada e das empresas de segunda geração. Assim, qualquer economia relacionada à redução da

demanda de vapor de super alta pressão irá refletir em uma redução da geração de vapor das caldeiras da Unidade de Utilidades e, assim, tenderá a reduzir o consumo de combustíveis da central termelétrica.

### 3.2.5 Aspectos da Geração de Vapor

A central deve gerar vapor de super alta pressão a partir do suprimento de água devidamente tratada na Unidade de Desmineralização e nos sistemas auxiliares das Caldeiras. As necessidades de água de alimentação das caldeiras (BFW – *boiler feed water*) são supridas a partir da produção de água desmineralizada e recuperação com tratamento de vapor condensado.

Cerca de metade da água desmineralizada (AD) fornecida para caldeiras e fornos provém de produção efetiva de AD a partir de corrente captada em rio (água superficial) e processada até atingir a qualidade final. Assim, há recuperação significativa de água, que demanda apenas tratamento em nível de remoção de sais ou hidrocarbonetos eventuais, constituindo o que se define como “polimento” de condensado. A partir destas correntes de água produzidas ou tratadas na estação de tratamento de águas (ETA), suprem-se os tanques de AD localizados na área de sistemas auxiliares. Na saída destes tanques e antes das bombas de alimentação do sistema de desaeração, é realizada a dosagem de aminas voláteis para controle de pH e, assim, eliminação de CO<sub>2</sub>, com o objetivo de evitar corrosão em tubos metálicos nos fornos e caldeiras.

Cerca de 1050 t.h<sup>-1</sup> de AD são alimentadas em três sistemas desaeradores que operam em paralelo, sendo estes equipamentos responsáveis pela remoção de gases incondensáveis (responsáveis por ataque corrosivo), além de permitir um aquecimento inicial da água de alimentação de caldeiras e fornos. Cada sistema desaerador é composto por três vasos, responsáveis por, respectivamente:

- Vaso desaerador: aspersão de AD e contato íntimo desta com vapor (VB) em bandejas – com isto, há o aquecimento de AD até a condição de saturação na pressão do desaerador. Além disto, a injeção de vapor também reduz a pressão parcial dos demais gases incondensáveis, facilitando a sua migração para fase vapor. O vapor injetado (cerca de  $150 \text{ t.h}^{-1}$ ) condensa-se ao aquecer a vazão de AD e segue também como água de alimentação de caldeiras e fornos;
- Permutador de calor: resfriamento da mistura vapor mais gases incondensáveis (onde o fluido frio é AD alimentada no desaerador), de forma a recuperar AD por condensação e garantir a expulsão quase exclusiva de gases incondensáveis;
- Reservatório: acúmulo de AD desaerado, de forma a garantir uma coluna de água mínima na sucção das bombas de água de alimentação de caldeiras (BFW);

As bombas de água de alimentação de caldeira succionam AD dos vasos reservatório. Existem oito bombas (cinco acionadas por motor elétrico e três acionadas por turbinas a vapor), de vazão em torno de  $200 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$  cada, e pressão em torno de  $138 \text{ kgf.cm}^{-2}$ . Operam normalmente seis bombas que enviam água de alimentação para os produtores de vapor da Indústria estudada, a saber:

- Fornos petroquímicos da Unidade de Processo 1 (recebem AD nas mesmas condições de temperatura e pressão da descarga das bombas de BFW);
- Fornos petroquímico da Unidade de Processo 2, sendo que três fornos recebem na mesma condição de descarga das bombas de BFW, mas os demais 5 fornos recebem BFW com temperatura de  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  devido à recuperação de calor nos gases de saída da turbina a gás da central termoelétrica;

- Caldeiras da Unidade de Utilidades, em número de três, sendo a corrente de BFW previamente aquecida com VM até 190 °C em um permutador casco-e-tubos com vapor de média pressão, com o objetivo de evitar temperaturas demasiadamente baixas no economizador, evitando assim condensação de gases a base de enxofre, que podem levar à corrosão externa dos tubos do economizador. Nestes produtores, o mix de combustíveis deve ser selecionado baseado em diversas premissas, como evitar níveis altos nos reservatórios de óleo residual de processo da Indústria estudada, maximização da queima do combustível mais acessível (hoje, carvão), consumo do gás combustível residual de processo e que não pode ser queimado nos fornos petroquímicos, sempre sob a atuação de restrições ambientais, como emissões de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e particulados.

A partir de estágio intermediário destas mesmas bombas também há retirada de corrente de AD de média pressão (60 kgf.cm<sup>-2</sup>) para uso em dessuperaquecedores das estações reductoras e no controle de temperatura nos geradores de vapor.

### **3.3 Sistema Elétrico**

A Indústria estudada consome energia elétrica proveniente de três fontes internas (geração própria) e / ou através de fonte externa (via duas entradas de fornecimento pela concessionária de energia elétrica). Em operação normal a demanda elétrica total da Indústria estudada é cerca de 56 MW, sendo que no horário de ponta (horário das 18:00 às 21:00, onde há maior demanda de energia elétrica para a concessionária) normalmente não há importação, e fora do horário de ponta há a compra de 5 a 10 MW. A demanda restante é suprida pelos três geradores internos: dois turbogeradores a vapor, componentes do ciclo Rankine da central termoelétrica e uma turbina de combustão, operando em ciclo Brayton, com aquecedor de água de alimentação de fornos

incrementando a eficiência deste sistema e reduzindo a temperatura dos gases de combustão. O sistema elétrico da Indústria estudada opera normalmente com uma entrada da concessionária em paralelo com os três turbogeradores, alimentando todas as demandas.

### 3.3.1 Turbogeneradores a vapor

Cada um dos dois turbogeradores é constituído basicamente pela sua respectiva turbina a vapor de duplo estágio e, acoplado a esta, o gerador elétrico, que fornece energia elétrica para o sistema de distribuição de 13,8 kV.

As turbinas 7TBG1 e 7TBG2 tem a finalidade de acionar os geradores de energia elétrica 7G1 e 7G2, respectivamente. São turbinas de extração-condensação, com potência nominal de 21 MW a 7098 rpm. Entre o gerador e a turbina, um redutor diminui a velocidade para 1800 rpm, equivalendo a uma potência nominal máxima de projeto de 17,67 MW. O vapor é admitido a 112 kgf/cm<sup>2</sup> g e 525°C e extraído a 42 kgf.cm<sup>-2</sup> e 415°C. O vapor exausto, removido do segundo estágio, é enviado para condensadores de superfície (7P1 e 7P2). Cada turbina consta de duas câmaras em um único corpo, chamadas de alta pressão (HP) e baixa pressão (LP), entre as quais é feita a tomada de extração. O fluxo de vapor percorre a turbina no sentido axial.

Nestes turbogeradores a rotação é mantida constante e a extração é controlada de acordo com o set point do controlador principal de VA ou de acordo com o set point estabelecido pelos operadores. Existem duas malhas de controle:

- Controle de Velocidade: corrige a rotação a partir da comparação da indicação com o *set point*, atuando na válvula controladora HP (admissão de VS). Há também uma compensação a partir da informação recebida do controlador de extração;

- Controle de Extração: corrige a vazão de extração a partir da comparação do valor medido com o set point do operador ou set point do controlador principal de VA (vale o maior valor), atuando nas válvulas controladoras LP (admissão de vapor no estágio de condensação). Há também compensação, mantendo constante a extração no caso de atuação da válvula HP (controle de velocidade) – exemplo: aumento de carga do turbogerador.

Os turbocompressores de Processo 1 e 2 possuem sistema de controle similar, apenas que, no controlador de velocidade, competem os sinais equivalentes ao set point de velocidade via operador ou via controlador de pressão de sucção dos compressores, sendo selecionado o menor valor.

Assim, para as turbinas de extração-condensação ou extração-contrapressão é possível manipular-se a vazão de extração e a admissão de VS, sendo variáveis dependentes destas a potência elétrica ou de eixo, a vazão de vapor ou condensado do último estágio e a rotação. No caso específico dos turbogeradores elétricos a vapor, o sistema de controle busca manter a rotação da turbina constante.

Por confiabilidade, a potência gerada nos turbogeradores é sempre mantida acima de 9MW, pois abaixo deste valor, em caso de sobrefrequência na concessionária, a turbina poderia sofrer uma parada de operação em emergência.

### **3.3.2 Turbogenerador de Combustão (Turbina a Gás)**

Este gerador consiste de uma turbina movimentada através da expansão de gases resultante da queima de combustível. O combustível normalmente utilizado é o gás natural proveniente da Bolívia, mas quando necessário pode ser utilizado o óleo diesel, combustível reserva. O ar é filtrado e depois pressurizado em um compressor acoplado ao eixo da turbina. O gerador está acoplado ao eixo através de um redutor. A capacidade

máxima de geração é 38 MW, no nível de 13,8 kV. No entanto, normalmente a turbina a gás opera gerando 30 MW. A limitação é causada pela capacidade de troca térmica do sistema de recuperação de energia do gás de combustão e também pelas características dos fornos das unidades de Processo 1 e 2 que passariam a receber uma corrente de água de alimentação a uma temperatura maior do que a projetada. Como o gerador está ligado a um sistema elétrico de distribuição de 34,5 kV, sua saída é alinhada a um transformador que eleva sua tensão de 13,8 kV para 34,5 kV possibilitando assim que ele alimente este sistema.

Após a geração de trabalho na turbina, os gases são redirecionados para serem liberados na atmosfera, normalmente passando primeiro por sistema de recuperação de calor. O sistema de recuperação de calor consiste em um permutador que aproveita a alta temperatura dos gases de saída da turbina (538 °C) para aquecer parte da água de alimentação dos fornos da planta de Processo 2, aumentando a eficiência da turbina a gás, de cerca de 30% para 65%. Em seguida o gás esfriado é liberado a cerca de 175 °C na atmosfera através da chaminé.

### **3.3.3 Importação da concessionária**

A energia fornecida pela concessionária é recebida pela Indústria estudada ao nível de 34,5 kV em subestação que recebe dois alimentadores subterrâneos provenientes da subestação principal do Complexo Petroquímico. Além do custo do MWh importado, no caso de haver consumo no período de ponta, há incidência da tarifa da “demanda” contratada na ponta, aplicada sobre a quantidade contratada neste período (25 MW), mesmo que o consumo efetivo seja menor do que este valor.

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGIA DE TRABALHO

O estudo foi realizado abrangendo todo sistema de vapor e energia elétrica da central petroquímica, dividindo o trabalho em quatro etapas principais:

a) Geração de uma planilha de cálculo para a rede de vapor e energia elétrica. Tal procedimento visa representação fiel da situação de cada situação a estudar, com as seguintes premissas:

- Coleta e tratamento de dados e disponibilização de informações ao modelo para otimização da rede termoelétrica;
- Introduzir correções de maneira que haja o fechamento do balanço de forma adequada (reconciliação de dados);
- Fornecer visão global e visão detalhada das entradas e saídas da rede de vapor;

b) Verificação da consistência dos dados medidos relacionados ao sistema de vapor, através do balanço em cada nível de vapor, comparando entradas e saída. Quando verificado problema em medição de vazão, foi solicitada correção ou utilizou-se outra maneira de obter o dado;

c) A geração do modelo de otimização do sistema termoelétrico, através da formulação das equações que representam o comportamento do sistema de vapor e energia elétrica, em linguagem de programação adequada para implementação de rotinas de otimização. O modelo é composto fundamentalmente pelas equações de balanço de massa e energia em cada nível de vapor e para equipamentos que possuem variáveis manipuláveis, assim como formulação com variáveis binárias para seleção de

equipamentos acionados por motores elétricos ou turbinas a vapor. O volume de controle da rede de vapor inclui apenas as entradas e saídas de vapor do sistema, não incluindo entradas de águas, com exceção da injeção de AD nas estações dessuperaquecedoras, essenciais para o fechamento correto do balanço nas válvulas redutoras – desta forma, se lida apenas com gerações e “sumidouros” de vapor da rede. Não foi considerada modelagem termodinâmica na formulação dos coletores de vapor, uma vez que em operação normal, o estado do vapor nos coletores varia dentro de uma faixa estreita: a estabilidade das pressões e temperaturas é a função das malhas de controle existentes nos coletores e estações redutoras de pressão. Além disto, a formulação termodinâmica dos estados do fluido de trabalho impõe não-linearidades no modelo;

d) Avaliação de ganhos potenciais, baseados na otimização do sistema de vapor e energia elétrica conduzindo estudos de casos;

É importante ressaltar que o objetivo principal do trabalho é o estudo do potencial de ganhos com otimização, através da geração de uma técnica sistemática que permita comparar a condição do sistema termoelétrico no presente ou a qualquer momento do passado com sua condição otimizada, e não restrita apenas a um relato situacional que deva ser generalizado.

Após a familiarização com o sistema termoelétrico da Indústria estudada, descrito no Capítulo 3, é possível observar que se trata de uma instalação de grande porte, cujo objetivo fundamental é suprir as demandas energéticas das unidades de processo e empresas clientes (e também da unidade de Utilidades) de forma ininterrupta. A Figura 4, extraída da tela detalhada do modelo de balanço de vapor da Indústria estudada ilustra os aspectos de porte e conectividade dos níveis de vapor.

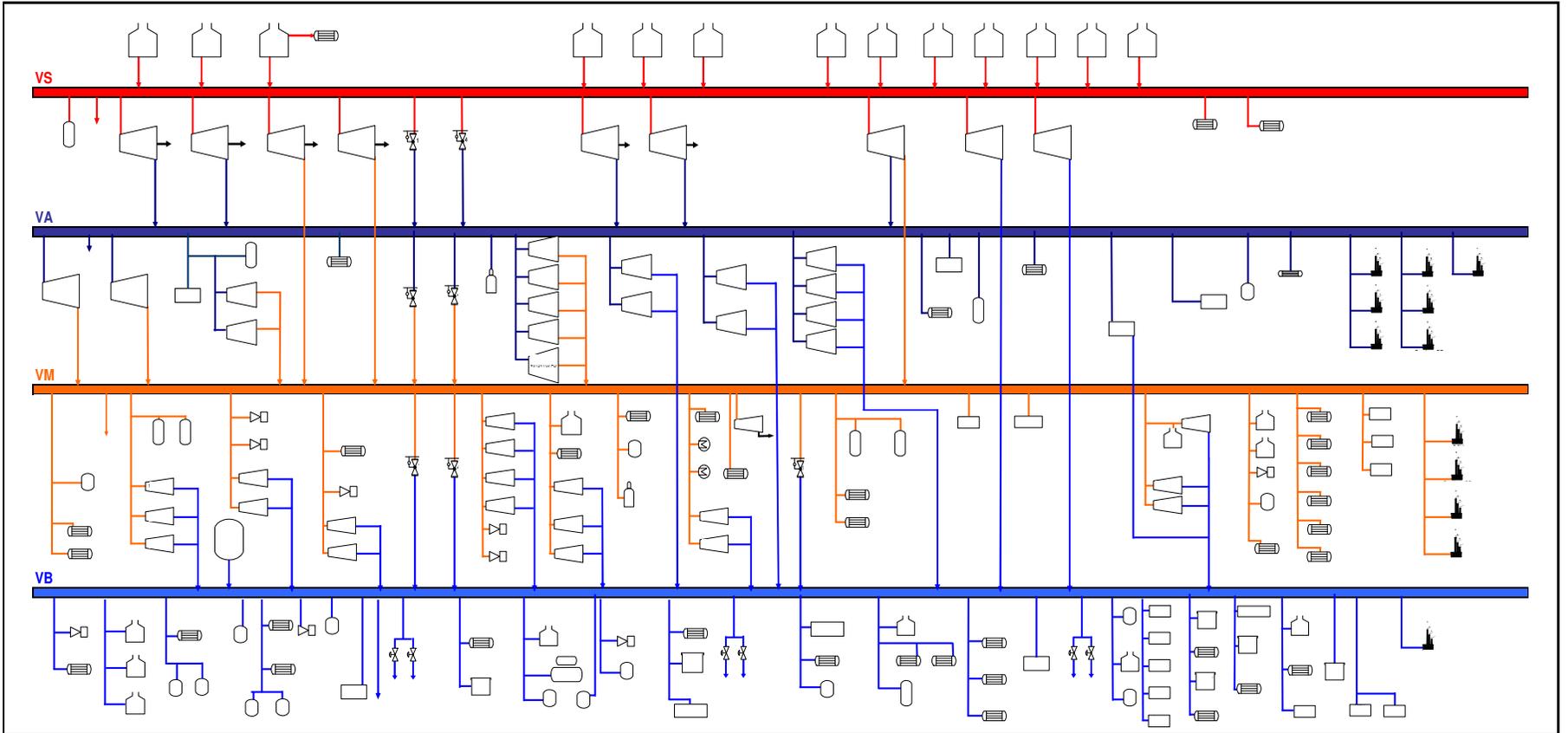


Figura 4: Representação da rede de vapor do sistema termoelétrico estudado.

Tentativas anteriores que envolveram construção de um modelo para simulação da rede de vapor na Indústria estudada esbarraram em erros consideráveis de balanço, principalmente relacionados ao nível de precisão e a atualização das informações utilizadas – muitas informações eram baseadas em valores médios ou em documentação de projeto, sem correção para carga efetiva. Tal modelo, desta forma, apesar de permitir uma fotografia razoável da rede de vapor da Indústria estudada para definir novas instalações em projetos, não teria precisão suficiente para ser aplicado em uma rotina diária de otimização. Também houve dificuldades significativas devido à aplicação de uma plataforma não amigável e sem acesso completo à base de dados. Assim, além dos problemas citados, o modelo anterior não foi atualizado adequadamente ao longo das modificações da planta.

O novo modelo, assim, deveria ser aberto, permitindo sua atualização no ritmo do crescimento da empresa e deveria se apropriar de dados gerados com rigor no tocante à precisão, a despeito de seu porte e grau de interconectividade. Como o objetivo do trabalho é viabilizar a otimização na frequência de uma vez por turno (proceder a verificação do resultado otimizado e ajustar o sistema para tanto a cada oito horas), as informações devem ser resgatadas de forma rápida e a construção do modelo deve garantir a precisão rigorosa das informações nesta condição.

As seguintes premissas balizaram então a metodologia de verificação e cálculos da rede de vapor via equações de massa e energia:

- Ser completamente gerado em planilha eletrônica (Excel). A central possui licença de uso deste software, que é amplamente conhecido e utilizado por todos níveis da empresa. Além disto, o programa é associado à base de dados que acumula as variáveis medidas e indicadas nos sistemas distribuídos de controle de dados (SDCDs) das unidades de produção, o que favorece o resgate praticamente instantâneo de dados do presente ou do passado;
- No arquivo da planilha estão centralizadas, em pasta específica, todas as informações relevantes a cada equipamento ou área que são entradas ou saídas de vapor e energia elétrica, sejam dados medidos, calculados, referências de projeto ou aspectos

práticos de operação. Esta abordagem favorece a organização e a apuração dos dados disponíveis para garantir o rigor desejado, além de permitir a interconexão das informações no mesmo arquivo;

- O arquivo de balanço de vapor contém ainda todo o tratamento de dados que é desnecessário incluir no modelo de otimização e que pouparia esforço computacional se fosse realizado previamente. Assim, definição de parâmetros das equações lineares dos modelos de otimização, introdução de dados manuais, agrupamento das correntes de saída fixas também são rotinas a serem executadas dentro deste arquivo do modelo de balanço, para posterior exportação de dados para o modelo de otimização.
- Telas visuais, detalhadas e resumidas do sistema de vapor também deveriam constar no arquivo da planilha, para permitir a visualização das situações reais e identificação preliminar de problemas nos dados resgatados;
- Finalmente, a planilha deveria também apresentar um sumário dos balanços em cada nível de pressão de vapor, permitindo verificar a precisão dos dados a serem exportados.

Além das premissas acima, algumas considerações foram relevadas para a construção do modelo da rede termoelétrica, a saber:

- Modelagem em estado estacionário para cada período estudado, como será explicado adiante;
- Variações de energia cinética são desconsideradas, já que a velocidade se mantém dentro da faixa de variação normal de projeto dos coletores, para cada nível de pressão.
- Variações de energia potencial também são desconsideradas, já que as tubulações permanecem com suas cotas atuais e as alturas envolvidas são pequenas para causar alguma limitação às forças motrizes envolvidas na distribuição de vapor;

- As tubulações são capazes de lidar com as variações de vapor e água, novamente considerando que as instalações permanecem as mesmas e seu projeto atende às condições de projeto dos equipamentos, incluindo aí os limites de entradas ou saídas de vapor e água. Desta forma, as variações de perda de carga que podem ocorrer com os ajustes previstos neste trabalho estão de acordo com os níveis de pressão trabalhados, e se alguma alteração for necessária, haverá maior ou menor abertura das válvulas de controle de admissão de vapor para compensar. Adicionalmente, apesar da idade da planta consideram-se as tubulações adequadas, já que há forte atenção por parte dos engenheiros e técnicos de manutenção, a qualidade do vapor é controlada e garantida e pelo fato de que trabalha-se na Copesul com vapor de água superaquecido. Todas estas características eliminam a formação de depósitos, corrosão e erosão nas tubulações, mantendo as características originais de resistência ao escoamento.
- As pressões e temperaturas são mantidas constantes nos coletores de vapor a partir das malhas de controle dedicadas a isto;
- Há manutenção dos tipos e proporção dos combustíveis nas caldeiras, como será explicado no capítulo 5.

## **4.1 TRATAMENTO DE DADOS**

Apesar de poder ser utilizado para outros propósitos, como investigação da distribuição de vapor, o objetivo fundamental da planilha de cálculos é garantir a precisão e subsidiar dados para o modelo de otimização. Desta forma, as informações resgatadas são tratadas de modo a serem exportadas já no formato adequado ao modelo para otimização da rede termoeletrica. Entre estas informações, figuram principalmente os parâmetros fixos da rede, geralmente dependentes unicamente da carga de produção das unidades de processo.

O trabalho em questão propõe o ajuste operacional da rede de vapor sem interferir na carga das plantas de processo, logo aquelas entradas ou saídas de vapor que

dependem exclusivamente da produção, não são manipuláveis, ou seja, devendo ser mantida para atender às demandas da planta. Estes equipamentos com vazões fixas de vapor estão distribuídos pela rede de vapor, sendo necessário, de forma sistemática, contabilizar suas vazões, classificá-los em grupos comuns para que suas informações sejam exportadas para o modelo de otimização. Esta é uma das funções principais da planilha de cálculo da rede termoeletrica. As cargas elétricas sofreram tratamento similar, com a diferença de que a potência fixa consumida foi obtida pela diferença da potência consumida total menos os consumos das cargas manipuláveis, basicamente relacionadas a acionadores do tipo motores elétricos que podem ser trocados por acionamento via turbinas a vapor, sem comprometer a carga de produção.

O primeiro passo para a construção da planilha de balanços foi o levantamento de toda documentação técnica envolvendo o sistema de vapor e seus componentes:

- Fluxogramas de tubulação e instrumentação (*pipe and instrumentation diagrams* - PIDs): apresentam de forma detalhada a seqüência dos fluxos por tubulações, equipamentos e a presença de instrumentação e malhas de controle, todos identificados. Como a malha de vapor abrange todas as unidades da Indústria estudada, foram analisados dezenas de PIDs, de praticamente todas as áreas.
- Fluxogramas de processo (*process flow diagrams* – PFDs): apresentam de forma sumarizada os balanços de massa relacionados aos fluxos das diversas correntes e áreas de produção.
- Folhas de dados de equipamentos e instrumentos: documentos onde se encontram as especificações de cada equipamento e instrumento, como limites de projeto e condições de operação.
- Modos de Operação: aspectos como preferências de operação, condição de integridade, frequência de manutenção e operação contínua ou intermitente não se encontram necessariamente explicitadas nos documentos acima, assim foi necessário verificar constantemente junto a operadores, engenheiros e em

manuais de operação, informações para representar o sistema de modo fiel e preciso.

A partir da documentação, foi construído um fluxograma principal da rede de vapor, contendo de forma sumarizada, mas completa, todos os equipamentos ou áreas que são entradas ou saídas dos quatro níveis de pressão de vapor e instrumentos de medição de vazão. Através da visão sistêmica oferecida por este novo documento, foi possível traçar todas as relações entre coletores e equipamentos. A varredura foi abrangente e detalhada, envolvendo até mesmo pequenas turbinas de sistemas de óleo de lubrificação de equipamentos maiores.

Quanto à aquisição de informações, já foi mencionada a necessidade de rigor, tanto em relação à precisão dos valores medidos ou calculados quanto na representatividade dos dados em relação à situação estudada. Essencialmente, as informações necessárias são as taxas de gerações, consumos e custos de vapor e energia elétrica, além das informações sobre a disponibilidade operacional de equipamentos. Fornos, caldeiras e turbinas de grande porte e mesmo algumas turbinas de médio porte possuem medições individualizadas de vapor e disponibilizadas nos SDCDs e daí distribuídas pelo sistema de aquisição de dados (SAD), o Aspen Explorer, permitindo assim resgate direto das variáveis atualizadas ou de períodos passados para a planilha de cálculo para rede termoeletrica. A atualização de informações no SAD ocorre de minuto a minuto. Assim, estando especificada a data e horário da situação real a ser estudada, o modelo resgata as informações disponíveis no SAD para executar a otimização propriamente dita em plataforma computacional adequada.

O sistema foi constituído para representar situações da rede de vapor em estado estacionário, não cobrindo, portanto transientes como momentos de parada ou partida de equipamentos. Como estes transientes representam um percentual menor do que 1% do tempo total de operação, não comprometem os ganhos de otimizações realizadas uma vez por turno (período de oito horas). Esta consideração também permite uma boa robustez à precisão do modelo, já que os SDCDs das plantas de Processo 1, 2, 3 e

Utilidades estão dessincronizados, podendo haver uma diferença de até quinze minutos entre informações de diferentes SDCDs resgatadas pelo SAD.

Todavia, ainda restariam muitos equipamentos, mesmo de médio porte, sem medição direta da vazão de vapor. Nestes casos, executaram-se diversos procedimentos que visam utilizar outras informações disponíveis no SAD que fornecessem um indicativo da condição de operação e que permitissem um cálculo com razoável precisão da vazão. Assim, por exemplo, a informação atualizada de rotação de bombas ou ventiladores turbinados, em conjunto com suas curvas de trabalho podem levar a uma avaliação aceitável da vazão de vapor. Da mesma forma aproveitaram-se sinais de aberturas de válvulas de controle, vazões de fluidos de processo em permutadores de calor e modelagem termodinâmica de vasos de flash e de estações dessuperaquecedoras. Em último caso, se nenhum destes procedimentos pode ser aplicado devido à escassez de informação no SAD, partiu-se para a utilização de dados obtidos em testes recentes ou então nas folhas de dados de projeto dos equipamentos. No caso de não haver nem mesmo a informação de operação de algum equipamento, sua situação (operando ou fora de operação) foi introduzida manualmente, assim como foi realizado com a atualização de custos de vapor e energia elétrica e com o estado de manutenção dos equipamentos que possuem variáveis manipuláveis.

Após estes comentários gerais, a seguir será explicada cada divisão, com detalhes de consideração.

#### **4.1.1 Banco de Dados de Equipamentos**

Cada equipamento que é entrada ou saída de vapor possui uma pasta específica onde estão centralizadas as informações sobre limites de projeto, condições de operação normal, medição ou cálculo de vazão da situação selecionado e informações práticas relevantes para o entendimento da forma de operação. A seguir serão explicados os procedimentos genéricos para obtenção da vazão de vapor para os equipamentos.

#### **4.1.1.1 Geradores de Vapor de Super Alta Pressão (Caldeiras e Fornos)**

São os fornos de Processo 1 que geram vapor superaquecido (1F2/3/6), os fornos de Processo 2 (11F01/02/03/04/05/06/07) e as caldeiras de utilidades (6GV01/02/03). Os fornos das unidades de Processo 1 e 2 representam entradas de vapor no sistema cujas vazões não são manipuláveis, gerando vapor a partir do calor residual do processo de craqueamento e as caldeiras de utilidades são entradas manipuláveis no sistema, ou seja, permitem variar sua carga sem depender diretamente da carga de produção. Todas estas fontes de vapor possuem medidores de vazão de vapor individualizados e sua indicação é assim diretamente alimentada nas suas respectivas pastas.

#### **4.1.1.2 Turbinas de Extração-Condensação e Extração-Contrapressão**

Todas as grandes turbinas (7TBG1/2, 2TBC1/21, 4TBC01/21 e 22TBC1) possuem medições de vazão na alimentação de VS e na vazão de extração de VA (para os 7TBG1/2, 2TBC1/21 e 22TBC1) ou na extração de VM (4TBC1/21). Adicionalmente, as máquinas 7TBG1/2, 2TBC1/21 e 4TBC1/21 possuem também medição de vazão após a bomba de condensado. Nestes últimos, como há redundância de informação resgatada, e como se tratam de grandes entradas e saídas de vapor, verificou-se em cada caso se a soma da vazão de extração mais a vazão de condensado equivale a vazão de entrada, fazendo-se uma reconciliação de dados quando necessária.

Este conjunto de vazões representa as variáveis mais importantes do modelo de otimização, uma vez que oferecem grande flexibilidade para busca de resultados otimizados. No capítulo referente ao modelo de otimização é explicado como estes equipamentos foram modelados a fim de representar seu comportamento real no problema de otimização.

#### **4.1.1.3 Equipamentos com medição de vazão disponível via SAD**

Além das turbinas de duplo estágio, caldeiras e fornos, existem vários equipamentos, como turbinas de estágios simples, permutadores, colunas de separação,

onde a medição do consumo (e, em alguns casos geração) de vapor é diretamente resgatada do SDCD. Todos estes equipamentos estão discriminados em cada coletor no Apêndice A, com o rótulo “vazão”. É possível um equipamento figurar como saída de vapor num dado coletor e como entrada de vapor em outro de menor pressão, o que ocorre geralmente com as turbinas de estágio simples.

#### 4.1.1.4 Turbinas com medição de rotação disponível via SAD

Para as turbinas com disponibilidade de indicação de rotação (utilizado para monitorar o funcionamento do equipamento) e de curvas de projeto relacionando consumo de vapor e potência de eixo, foi possível avaliar o consumo real a partir da determinação da potência da turbina em função da rotação da mesma. Os equipamentos que foram analisados desta forma são turbinas que acionam bombas e ventiladores. Para qualquer um destes equipamentos rotativos, a seguinte relação entre potências ( $Pr_1$ ,  $Pr_2$ ) e rotações ( $nr_1$ ,  $nr_2$ ), referentes a duas situações é válida para o mesmo equipamento (mesmo diâmetro de rotor e eficiência) e sem haver variação da densidade do fluido (consideração válida para fluidos incompressíveis no caso de bombas e aceitável para pequenas variações de pressão durante o escoamento, como é o caso de ventiladores):

$$\frac{Pr_2}{Pr_1} = \left( \frac{nr_2}{nr_1} \right)^3 \quad (5)$$

Sendo que os índices ‘1’ e ‘2’ podem representar respectivamente condição de projeto e condição real. A rotação de bombas ou ventiladores ( $n_r$ ), por sua vez, pode ser relacionada à rotação de sua turbina ( $n_t$ ) acionadora através do fator de redução,  $\varphi$ , sendo este um número positivo menor ou igual a 1 (quando igual, não há redutor). Assim:

$$n_r = n_t \varphi \text{ sendo que } 0 < \varphi < 1 \quad (6)$$

A potência da bomba ou ventilador ( $P_r$ ) também é relacionada à potência de sua respectiva turbina ( $P_t$ ) através da sua eficiência mecânica ( $\eta_m$ ):

$$P_r = P_t \cdot \eta_m, \text{ sendo que } 0 < \eta_m < 1 \quad (7)$$

Como os fatores de redução de rotação e eficiência são os mesmos, já que se tratam dos mesmos equipamentos, as relações estão validadas para suas turbinas. Finalmente, é possível substituir as relações (6) e (7) em (5) obtendo-se:

$$\frac{Pt_2}{Pt_1} = \left( \frac{nt_2}{nt_1} \right)^3 \quad (8)$$

Para exemplificar o procedimento, toma-se a turbina de um ventilador de tiragem forçada da fornalha da caldeira a óleo (4GV1), que foi projetada para uma condição nominal de 5785 rpm consumindo uma potência de 1050 kW.

Na Figura 5, a curva fornecida pelo fabricante é reproduzida. A condição de operação corresponde à situação “H.V. (*hand valve*) open”, com admissão plena de vapor pela válvula da entrada.

Para condição normal de vapor de alimentação de 43 kgf.cm<sup>-2</sup> e 400°C, vapor exausto de 19 kgf.cm<sup>-2</sup> e válvula de admissão (HV) de vapor na turbina aberta, a Tabela 2 apresenta dados de potência gerada e vapor consumido, extraídos da Figura 5.

Para obtenção da equação regente, regressão linear foi aplicada, devido ao comportamento observado no documento do fabricante (Figura 5), obtendo-se:

$$\dot{m}_{VA_{real}} = 0,0132Pt_{real} + 20,355 \quad ; \text{ com } R^2 = 0,9999 \quad (9)$$

Sendo que  $R^2$  é o coeficiente de correlação que indica a proporção da variância dos dados ajustados para com os dados experimentais, sendo uma medida da aderência da equação para com o conjunto de dados reais.

Combinando a Equação (9) com a equação (8) análoga a bombas ou ventiladores e usando a condição nominal, tem-se:

$$\dot{m}_{VA_{real}} = 0,0132 \left( 1050 \left( \frac{nt_{real}}{5785} \right)^3 \right) + 20,355 \quad (10)$$

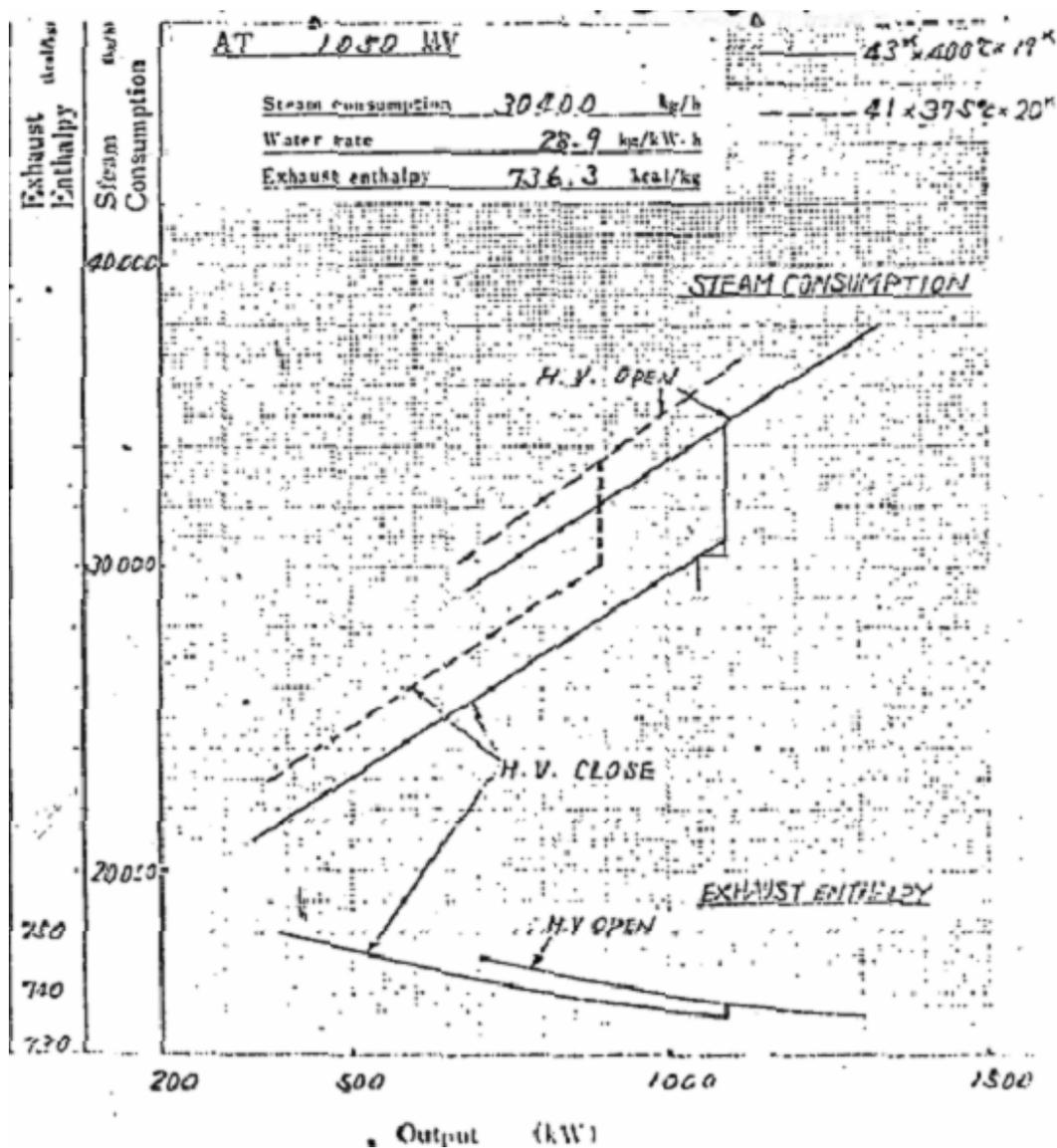


Figura 5: Curva de consumo da turbina de ventilador de tiragem forçada da caldeira a óleo da empresa estudada. (Fonte: MHI Ltd., 1980)

Desta forma procedeu-se para todas as bombas e ventiladores apresentados no Apêndice A e que estão classificados como “curva”. De uma forma geral, as retas que relacionam vazão de vapor e potência podem ser representadas por:

$$\dot{m}_{VAreal} = a_i P_{treal} + b_i \quad (11)$$

TABELA 2: Relação entre potência gerada e vapor consumido para turbina de ventilador de tiragem forçada de caldeira a óleo

Potência Gerada (kW)	Vazão de VA Consumido (t/h)
1200	36,2
1000	33,5
700	29,6

Sendo  $i$  referente ao  $i$ -ésimo equipamento modelado e, genericamente, para cada equipamento  $i$ , tem-se:

$$\dot{m}_{VA,real} = a_i \left( Pt_{projeto} \left( \frac{n_{real}}{n_{projeto}} \right)^3 \right) + b_i \quad (12)$$

#### 4.1.1.5 Turbinas de bombas que possuem medição de vazão de água

Este procedimento aplica-se a bombas de médio porte e que possuem medição de vazão de água. Basicamente foi aplicado às bombas de água de resfriamento, da torre de resfriamento da planta de Processo 1 e bombas de BFW. Este procedimento é uma maneira de estimar os consumos de vapor das turbinas que acionam estes equipamentos, utilizando informações medidas e dados de projeto. O procedimento é realizado da seguinte forma: a partir da medição de vazão total de água bombeada (informação disponível via SAD) e do número de bombas operando (o *status* de operação de cada bomba é obtido via sinal disponível no SDCD ou por inserção manual, quando não houver sinal confiável) calcula-se a vazão de água movimentada por bomba. De posse das curvas de performance da bomba e da turbina, ambas disponibilizadas pelos seus respectivos fornecedores, é possível correlacionar-se o consumo da turbina com a vazão de água da respectiva bomba. Como exemplo, será apresentado o procedimento aplicado às turbinas das bombas de água da torre de resfriamento da planta de Processo 1.

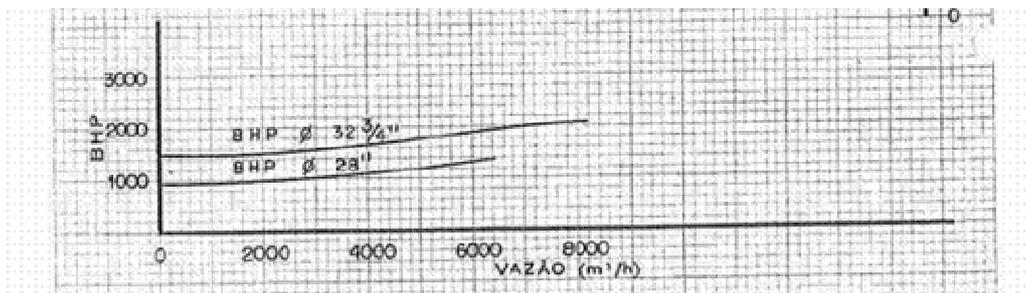


Figura 6: Detalhe da curva de capacidade versus potência para bomba de água de resfriamento (AR). (Fonte: Worthington Bombas, 1980)

TABELA 3: Relação entre vazão e potência consumida em bomba de água de resfriamento

Vazão de AR (t/h)	Potência Consumida (kW)
2000	1000
4000	1125
6000	1275
8000	1400
10000	1400

Na Figura 6 e na Tabela 3, a curva aplicável refere-se ao rotor de 28". Através destas informações, obtém-se a equação que representa o comportamento da potência de eixo em função da vazão de AR ( $\dot{m}_{AR}$ ):

$$Pr = -5,10^{-6} \dot{m}_{AR}^2 + 0,112 \dot{m}_{AR} + 780; \text{ com } R^2 = 0,9815 \quad (13)$$

Assim, de uma forma genérica, para uma bomba  $j$  com medição de vazão de seu fluido bombeado, tem-se:

$$Pr_j = a_j \dot{m}_{\text{Água}_j}^2 + b_j \dot{m}_{AR_j} + c_j \quad (14)$$

A seguir, encontra-se a relação entre consumo de vapor e potência gerada na turbina acionadora da bomba de AR, representada na Figura 7. A relação entre potência

gerada e vapor consumido na turbina é apresentado na Tabela 4, a partir de dados extraídos da curva do equipamento.

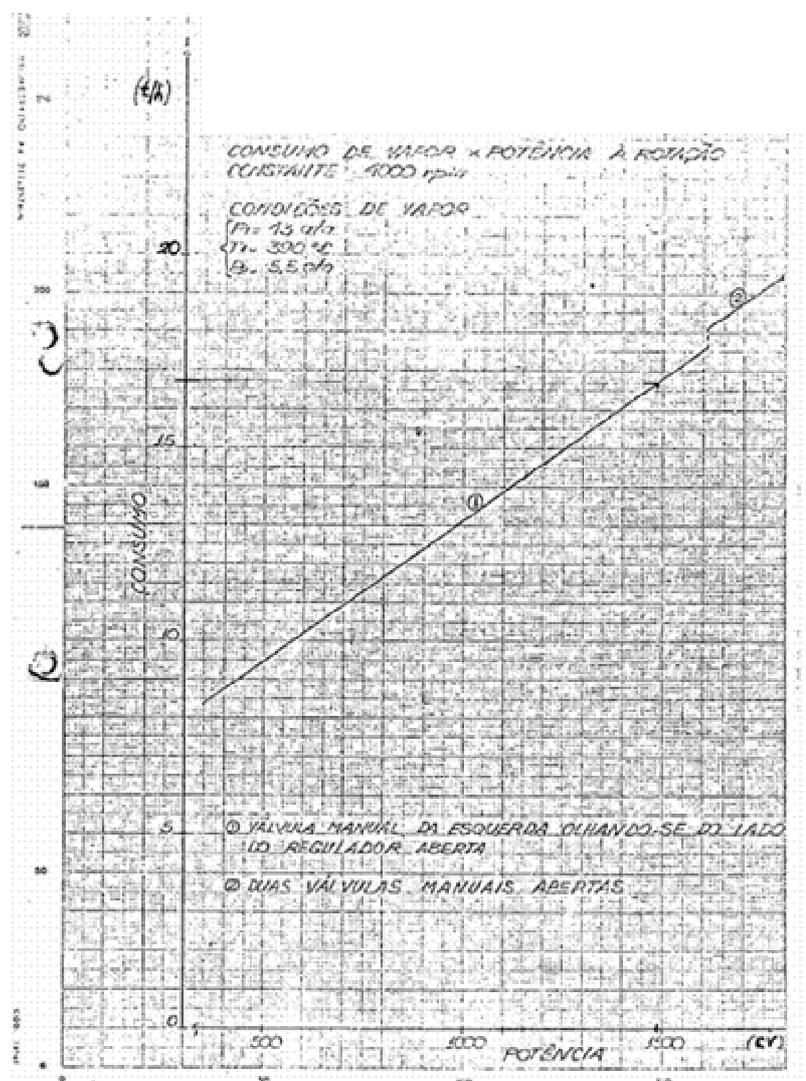


Figura 7: Curva da potência gerada em função do consumo de vapor. (Fonte: Dedini S.A., 1980)

TABELA 4: Relação entre potência gerada e vapor consumido na turbina

Potência Gerada (kW)	Vazão de VA Consumido (t/h)
500	9,5
1000	13,2
1500	16,7

Via regressão linear dos dados da Tabela 4, tem-se a Equação (15), considerando rotação constante:

$$\dot{m}_{VA_{48TBB01}} = 7,2 \cdot 10^{-3} Pt_{48TBB01} + 5,9167, \text{ com } R^2 = 0,9999 \quad (15)$$

E, também de uma forma geral para uma turbina de bomba  $j$  com medição de vazão de seu fluido bombeado:

$$\dot{m}_{VA_j} = r_j Pt_j + s_j \quad (16)$$

Considerando que toda a potência desenvolvida pela turbina é consumida pela bomba, é possível formular uma relação entre consumo de vapor na turbina e vazão de água bombeada. Genericamente:

$$\dot{m}_{VA_j} = r_j a_j \dot{m}_{AR_j}^2 + r_j b_j \dot{m}_{AR_j} + (r_j c_j + s_j) \quad (17)$$

Mesmo com perdas não contabilizadas na bomba e no redutor, é possível por este método corrigir o consumo de vapor de acordo com a variação na vazão do fluido bombeado, fornecendo uma estimativa mais precisa do que apenas considerar o consumo de projeto.

#### 4.1.1.6 Turbinas de equipamentos com informação de *status* de operação

Várias turbinas não possuem a mesma quantidade de informação do item anterior. A verificação do *status* de operação destas máquinas é feita através de resgate de sinal de *status*, disponível para algumas turbinas no SDCD, ou então por inserção

desta informação manualmente na planilha de tratamento de dados. Para ambos os casos, considerou-se que a turbina está com o consumo de vapor em condição prevista em projeto. Esta consideração não agrega grandes imprecisões com relação ao consumo real destas turbinas, uma vez que as turbinas modeladas assim são, de uma maneira geral, turbinas pequenas e de baixo consumo de vapor.

Algumas considerações também foram feitas nestes casos, pois alguns equipamentos têm configuração operacional bastante característica. Como exemplo, podem ser citadas as turbinas das bombas de óleo de lubrificação de grandes máquinas, que só operam em caso de partida destas máquinas, ou quando estão paradas em espera de partida. Ou seja, as informações de operação destes equipamentos estão vinculadas à condição operacional de seus respectivos compressores e turbogeradores. De maneira similar, para cada turbina foram verificadas as situações operacionais que implicam na operação ou parada destas turbinas e, então, condicionada esta informação ao consumo de projeto da turbina.

A necessidade de inserção manual de status de alguns equipamentos, por sua vez, tende a aumentar o tempo total de análise e otimização da situação real, uma vez que deve-se realizar contato com a operação da área onde o equipamento de interesse está localizado, aguardar a verificação e atualizar o seu *status* na planilha. Todavia, apesar do aumento do tempo em alguns minutos, ainda assim permite representar adequadamente o período estudado, já que o sistema opera sem alterações de máquinas no curto prazo. No caso de dados passados, pode-se recorrer à folhas de leitura, preenchidas a cada turno. Para o futuro, no entanto, é recomendável a disponibilização dos sinais de status de todas as turbinas no SDCD para tornar o processo de avaliação mais rápido e menos susceptível a erros de leitura.

#### **4.1.1.7 Vasos de *Flash* de Condensado**

Os vapores de média, alta e até super alta pressão (VM, VA e VS), quando utilizados em permutadores para aquecer ou vaporizar correntes de processo via calor latente, depois de liquefeitos são coletados e encaminhados para vasos de *flash*, com o objetivo de recuperar parte dos condensados de alta entalpia produzindo VB e separar

condensado de baixa pressão para reuso. Nestes vasos os condensados de média, alta e super alta pressão (CM, CA e CS) são expandidos para a pressão de  $4,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$  (pressão de VB), estando os vasos interligados com tubulações de baixa pressão (VB) – ou seja, o coletor de VB estabelece a pressão de *flash*.

É importante perceber que o vapor formado nesta condição é sempre saturado, sendo misturado no coletor de VB com corrente superaquecida. Na seção inferior dos vasos de *flash*, é mantido um nível de condensado de baixa pressão (CB), que segue continuamente, via bombeamento, para sistema de polimento na Estação de Tratamento de Águas juntamente com condensados de vácuo (recuperado na saída dos condensadores de superfície das grandes turbinas de extração-condensação).

Existem quatro principais vasos de flash de condensados, classificados como entradas fixas de vapor de baixa pressão: na planta de Processo 1 (1 vaso), na planta de Processo 2 (1 vaso) e na Utilidades (2 vasos). A seguir, serão apresentadas as considerações feitas sobre as três correntes envolvidas no processo de separação em cada vaso.

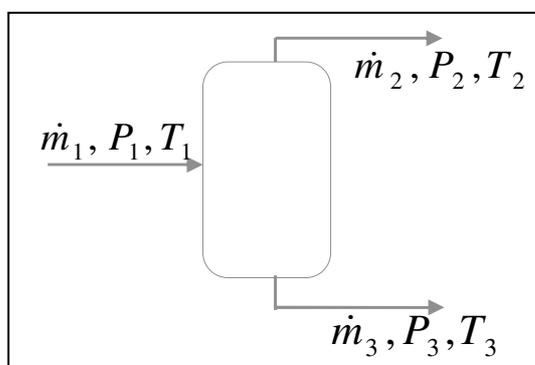


Figura 8: Representação de um vaso de *flash* de vapor.

Na Figura 8, a vazão de entrada  $\dot{m}_1$ , dependendo do vaso, pode reunir um conjunto de correntes com diversos estados, a saber, (condições especificadas a montante da válvula de entrada de cada vaso):

- Condensado de média pressão a  $P_1 = 15 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ;

- Condensado de alta pressão a  $P_1 = 40,6 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ;
- Condensado de super alta pressão a  $111 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ;

Estes estados consideram perda de carga de cerca de  $2 \text{ kgf.cm}^{-2}$  no circuito e referem-se a condições de saturação, devido à utilização de calor latente e com subresfriamento desprezível nos permutadores, conforme condições previstas em folha de dados. Foram desconsideradas correntes de CM dos 1P21 e 10P39, que geram grandes vazões de condensado, mas subresfriados a  $15 \text{ kgf.cm}^{-2}$  e  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , sem potencial para geração de VB em flasheamento.

As vazões de saída são caracterizadas pelas seguintes condições, também em estado de saturação:

- $\dot{m}_2$  (vapor de baixa pressão) a  $P_2 = 4,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$
- $\dot{m}_3$  (condensado de baixa pressão) a  $P_3 = 4,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$

Os balanços de massa e energia foram estabelecidos obedecendo as seguintes premissas:

- Estado estacionário;
- Arraste de gotículas desprezível;
- Sistema isolado, com perdas de calor desprezíveis (*flash* adiabático);

Assim tem-se, para o caso de CM (os balanços de CA e CS são executados de forma semelhante):

Balanço de massa:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (18)$$

Balanço de energia:

$$h_1 \dot{m}_1 = h_3 \dot{m}_3 + h_2 \dot{m}_2 \quad (19)$$

Da combinação das equações (18) e (19):

$$h_1 \dot{m}_1 = h_3 (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) + h_2 \dot{m}_2 \quad (20)$$

Aplicando-se as entalpias das correntes conclui-se que:

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = 0,097 \quad (21)$$

Ou seja, o flasheamento ocorre de maneira que 9,7% da corrente de entrada (CM) vaporiza gerando VB e 90,3% gera condensado de baixa pressão. Com VA chega-se a valores de 20,6% e 79,4% de geração de VB e CB, respectivamente. Para CS, os valores são 41% e 59% de geração de VB e CB, respectivamente.

Como as correntes de entrada  $\dot{m}_i$  (CM, CA ou CS) são conhecidas, as demais correntes foram calculadas pela resolução do sistema de equações (18) e (19).

#### 4.1.1.8 Válvulas redutoras de pressão:

Dentro deste grupo estão as 6PV12 e 1PV51 (válvulas cuja entrada é VS e a saída, VA), 6PV13 e 1PV52 (válvulas cuja entrada é VA e a saída, VM), 6PV14, 1PV13 e 10PV4 (válvulas cuja entrada é VM e a saída, VB). Representam variáveis importantes para o sistema, uma vez que elas complementam, quando necessário, a demanda dos níveis inferiores. A pressão é especificada no coletor inferior pela atuação da própria válvula, enquanto outra malha de controle regula a temperatura do vapor rebaixado pela injeção de AD após a válvula redutora – assim, há introdução de uma vazão mássica de água (borrifo) na saída da válvula. O balanço em tais válvulas, representadas na Figura 9, pode ser apresentado da seguinte forma:

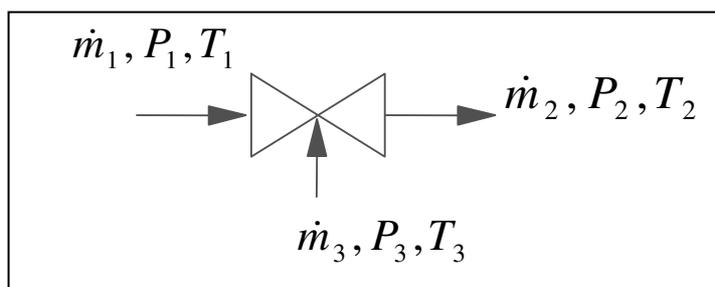


Figura 9: Correntes em uma válvula redutora de pressão.

Sendo as vazões de entrada:

- $\dot{m}_1$  (vapor);

- $\dot{m}_3$  (AD;  $P_3 = 62 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ,  $T_3 = 147 \text{ }^\circ\text{C}$ , logo  $h_3 = 623 \text{ kJ/kg}$ )

E vazão de saída:

- $\dot{m}_2$  (vapor cuja pressão  $P_2$  equivale ao nível imediatamente inferior a  $P_1$ )

As seguintes equações de balanço estão envolvidas:

Balanço de massa:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \dot{m}_3 \quad (22)$$

Balanço de energia:

$$h_1\dot{m}_1 + h_3\dot{m}_3 = h_2\dot{m}_2 \quad (23)$$

onde:  $h_i$  = entalpia específica da corrente  $i$  ;

A Tabela 5 apresenta estados do vapor e AD para borrfio nos coletores, dentro da faixa de variação aceitável, com suas respectivas entalpias.

TABELA 5: Estados referentes aos quatro níveis de vapor e de água desmineralizada para dessuperaquecimento.

	VS	VA	VM	VB	AD
Temperatura ( $^\circ\text{C}$ )	525	410	320	225	147
Pressão ( $\text{kgf/cm}^2 \text{ a}$ )	114	44	19	5,5	62
Entalpia ( $\text{kJ/kg}$ )	3424,5	3233,9	3074,5	2906,9	622,8

Aplicando as relações acima, obtêm-se as seguintes frações de AD de borrfio na composição da corrente de saída das válvulas redutoras: 6,8% de VS para VA, 6,1% de VA para VM e 6,8% de VM para VB.

#### 4.1.1.9 Válvulas de Alívio de Pressão

Todos os coletores de vapor têm válvulas para controle de pressão. O coletor de VS tem o controle de pressão mínima vinculado ao aumento de carga das caldeiras e o controle de pressão máxima através das válvulas de redução de pressão VS/VA. No caso de atingir níveis maiores, abre-se alívio de VS. Os coletores de VA e VM têm o controle de pressão máxima e mínima mediante a abertura ou fechamento das válvulas de redução de pressão do nível energético a montante e a jusante ao coletor controlado.

No caso do coletor de vapor de baixa pressão, o controle de máxima pressão é realizado por cinco válvulas de alívio de VB para a atmosfera, as 6PV26 A/B, localizadas no coletor de VB de utilidades, as válvulas 1PV14 A/B, localizadas no coletor de Processo 1 e a 10PV1, localizada no coletor de Processo 2. A abertura da válvula 10PV1 ocorre de acordo com o sinal de pressão no coletor de Processo 2, possuindo medição de vazão própria e resgatável para a planilha via SAD. Já a abertura das 6PV26 A/B (ambas com capacidade de  $85 \text{ t.h}^{-1}$ ) e 1PV14 A/B (ambas com capacidade de  $55 \text{ t.h}^{-1}$ ) é definida por malha de controle a partir do sinal do controlador-indicador de pressão (PIC) no coletor de VB da unidade de utilidades, o qual tem um seqüencial de abertura e divisão de vazão específicos para estas quatro válvulas de alívio. Este seqüencial pode ser visualizado na Tabela 6, já com as aberturas das válvulas convertidas em vazões de acordo com o comportamento de sua curva de vazão *versus* abertura. Este sistema procura apresentar o comportamento destes pares de válvulas com *split-range*, aplicadas de modo a permitir que se trabalhe em aberturas adequadas para a larga faixa de capacidade de alívio do sistema. O sinal do PIC é disponível através do SAD.

Apesar da discretização de dados de sinal e de vazões, foi possível definir a vazão resultante de sinais intermediários a partir de interpolações entre as faixas de sinais, entre 0 e 100%. A interpolação foi conduzida em cada uma das 4 válvulas, para cada conjunto consecutivo de duas faixas. A soma das vazões ocorridas em cada válvula indica o total de alívio ocorrido. Cabe ressaltar que esta distribuição teórica de vazões é uma condição apenas esperada do comportamento das válvulas. Na prática, são observados desvios consideráveis nos balanços que envolvem a presença de alívios de

vapor. A fim de minimizar o erro de balanço no coletor de VB devido a esta condição, as vazões calculadas de alívio estão corrigidas com um fator multiplicativo. Resultados menos díspares foram obtidos com um fator de 0,8, mas ainda assim apresentando um erro médio relativo de cerca de 19% no balanço do coletor de VB.

TABELA 6: Vazão de vapor pelas válvulas de alívio a partir de comando do controlador de pressão máxima do coletor

Sinal de comando do Controlador %	Vazão de VB nas válvulas de Alívio em Utilidades t.h <sup>-1</sup>	Vazão de VB nas válvulas de Alívio em Processo t.h <sup>-1</sup>
0	170,0	110,0
10	131,8	85,3
20	99,5	64,4
30	74,0	47,9
40	51,0	33,0
50	33,2	21,5
60	19,6	12,7
70	12,8	8,3
80	6,8	4,4
90	2,6	1,7
100	0,0	0,0

A partir desta limitação, e considerando que a operação com abertura de alívio é uma condição que pode ser evitada operacionalmente sem a intervenção do modelo de otimização, recomenda-se sempre primeiro atuar via procedimentos para fechar alívios de vapor e após rodar o modelo para buscar a condição otimizada.

#### 4.1.1.10 Vaso Desaerador

Como já foi visto, os desaeradores eliminam oxigênio e gás carbônico da água de alimentação de fornos e caldeiras a partir da introdução de uma corrente de vapor de baixa pressão, para aquecer a água a uma temperatura ótima na qual a solubilidade do oxigênio se reduz aos níveis desejados. Com um consumo em VB de cerca de 13% da

corrente de AD para alimentação de produtores de vapor, este equipamento é de fundamental importância para um balanço robusto de VB. Todavia, não há medição direta de vazão de vapor alimentado ao equipamento, havendo necessidade de desenvolvimento de seu balanço de vapor.

Os desaeradores (6V4 A/B/C) recebem AD a partir de corrente advinda da ETA composta de 45% de AD produzida cuja temperatura é estimada a partir de medição localizada na entrada da unidade de osmose reversa e 55% de condensado reciclado com temperatura média de 40°C após polimento. Estas correntes misturam-se nos vasos 6TQ5a/5b, antes de serem alimentadas ao desaerador, recuperam calor em diversos resfriadores de condensado, condensadores de vapor de vasos de *flash* atmosférico, etc. Há um incremento de 40°C na corrente de AD para os desaeradores após esta recuperação de calor. Com estes valores, é possível estimar a temperatura da água alimentada no desaerador, fundamental para determinação da vazão de VB consumida nos vasos:

$$T_{AD_{entrada}} = (0,45.T_{AD_{produzido}} + 0,55.40^{\circ}C) + 40^{\circ}C \quad (24)$$

A Figura 10 apresenta as correntes de interesse em um desaerador típico.

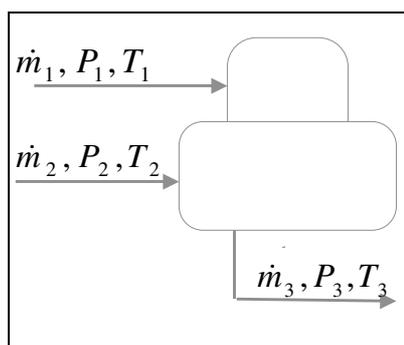


Figura 10: Esquema de fluxos em sistema desaerador.

Sendo as vazões de entrada:

- $\dot{m}_1$  (AD) com  $P_1 = 10 \text{ kgf.cm}^{-2}$  e  $T_1 = T_{AD_{entrada}}$  (condição a montante da válvula de controle de alimentação de AD)
- $\dot{m}_2$  (VB) com  $P_2 = 4,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$  e  $T_2 = 225^\circ\text{C}$  (condição a montante da válvula de controle de injeção de VB)

E os Fluxos de Saída:

- $m_3$  (BFW) com  $P_3 = 3,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$  e  $T_3 = 147^\circ\text{C}$ , lembrando que o desaerador é controlado nesta pressão e na condição de saturação.

As seguintes equações de balanço estão envolvidas:

Balanço de massa:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (25)$$

Balanço de energia:

$$h_3\dot{m}_3 = h_1\dot{m}_1 + h_2\dot{m}_2 \quad (26)$$

Considera-se o desaerador suficientemente isolado, de maneira que o sistema analisado é adiabático. Os estados 2 e 3 são conhecidos e assim suas entalpias são determinadas. É possível, por outro lado, determinar-se  $T_1$  a partir da Equação (24), na qual a temperatura do AD produzido na ETA é disponível em SDCD.

Em relação às vazões, é possível obter  $\dot{m}_3$  a partir dos consumos medidos de BFW para as caldeiras de utilidades e fornos das plantas 1 e 2, mais o consumo de AD para dessuperaquecimento. Todas estas medições de vazão estão disponíveis no SDCD, podendo ser resgatadas via SAD.

Assim, nas Equações (25) e (26) são conhecidas todas as entalpias das correntes e vazão  $\dot{m}_3$ . Resolvendo-se o sistema, tem-se as demais vazões. Assim, a partir de informações resgatadas via SDCD e de entalpias conhecidas, é possível definir a vazão de VB alimentada no desaerador, informação necessária ao balanço de vapor.

A vazão de VB para os desaeradores não é uma variável manipulável, e sim um parâmetro fixo definido na planilha de cálculo a partir de dados do SDCD. Esta vazão de VB deve ser atendida para os desaeradores no modelo para otimização.

#### 4.1.1.11 Permutadores de calor sem medição de vapor

O tratamento dado a permutadores de calor sem medição de vazão de vapor depende da quantidade de informações disponível e que possam ser relacionadas ao consumo de vapor. Algumas premissas gerais utilizadas para proceder à caracterização dos consumos são:

- Permutadores de uso descontínuo: busca-se informação que indique no mínimo quando o permutador está operando. Consumos de vapor em permutadores utilizados em reativação de catalisadores, por exemplo, podem ser verificados a partir da ocorrência de determinada temperatura da corrente que está sendo aquecida para realizar a reativação, indicando assim que o procedimento está em andamento. Neste caso, a temperatura é disponível no SDCD e, ultrapassado o valor máximo, o modelo atribui a este permutador o consumo de vapor disponível em projeto;
- Aquecedores com temperaturas de processo disponíveis: nestes casos há disponibilidade da variação de temperatura da corrente de processo e é possível estimar o consumo de vapor considerando-se a vazão do fluido de processo como constante e igual ao valor de projeto, ou seja:

$$\dot{m}_{\text{vapor}} \cdot (h_{\text{vapor}} - h_{\text{condensado}}) = \dot{m}_i \cdot C p_i \cdot \Delta T_i \quad (27)$$

e,

$$\left[ \dot{m}_{\text{vapor}} \cdot (h_{\text{vapor}} - h_{\text{condensado}}) \right]_{\text{projeto}} = \left[ \dot{m}_i \cdot C p_i \cdot \Delta T_i \right]_{\text{projeto}} \quad (28)$$

Sendo i qualquer corrente de processo aquecida por vapor.

Considerando que no intervalo de temperaturas de operação os calores específicos e as diferenças de entalpia não variem de forma significativa em relação ao valor de projeto, ou seja,

$$[Cp_i]_{projeto} \cong Cp_i \quad (29)$$

e,

$$[(h_{vapor} - h_{condensado})]_{projeto} = [(h_{vapor} - h_{condensado})] \quad (30)$$

e considerando, como foi mencionado,

$$[\dot{m}_i]_{projeto} = [\dot{m}_i] \quad (31)$$

é possível determinar a vazão atual de vapor:

$$\dot{m}_{vapor} = [\dot{m}_{vapor}]_{projeto} \cdot \frac{\Delta T_i}{[\Delta T_i]_{projeto}} \quad (32)$$

- Disponibilidade de sinal de abertura de válvula de admissão de vapor: nestes casos atribui-se a abertura plena da válvula o consumo máximo do equipamento. No caso de válvula com abertura parcial, o consumo é considerado proporcional à abertura da válvula (abertura de 30% corresponde a um consumo de 30% da vazão máxima prevista em projeto).

#### 4.1.1.12 Equipamentos sem nenhum sinal de operação

Apesar de haver uma quantidade razoável de equipamentos nesta situação, em geral representam consumos de vapor muito pequenos, menor do que 0,5 t.h<sup>-1</sup>. Dependendo da sua frequência de operação, decide-se o valor que será atribuído a seu consumo. A equipamentos de operação contínua foram atribuídos valores de operação previsto em projeto. Já para equipamentos de uso descontínuo e com baixa frequência de operação foi atribuído valor zero.

Outra consideração importante refere-se à condição de “giro lento” para turbinas que não estão operando. Este expediente é utilizado para manter a turbina aquecida e pronta para entrar em operação, executado de forma a admitir vapor na turbina, da alimentação até a exaustão. O valor médio utilizado nesta condição é de  $0.5 \text{ t.h}^{-1}$  nas turbinas médias e grandes e de  $0,1 \text{ t.h}^{-1}$  nas turbinas de pequeno porte.

#### **4.1.2 Planilhas de Balanço**

Em 4 planilhas são calculados, respectivamente, os balanços nos coletores de VS, VA, VM e VB, para cada área da empresa.

Em cada planilha, há duas colunas principais, onde são resgatados os dados de entrada e de saída do vapor em questão para a situação estudada. Em ambas as colunas os equipamentos estão agrupados representando áreas ou unidades em comum. Os valores de entrada ou saída do vapor de cada um destes equipamentos são resgatados do banco de dados, totalizando-se também a saída e entrada por grupo comum. Apesar de resgatar informações vindas do banco de dados, há algumas informações introduzidas na própria planilha, como estimativa de perdas em cada coletor.

Cada planilha apresenta então o valor total calculado de entradas e saídas no coletor do vapor. Os erros absoluto e relativo de balanço também são fornecidos, e são utilizados para indicar a precisão do modelo. Em geral, consultorias de conservação de energia citam como referência para balanços bem formulados a obtenção de erros menores do que 3%, 5%, 7% e 10%, respectivamente para níveis de VS, VA, VM e VB. Este escalonamento de precisões está coerente, já que no coletor de VS há poucos equipamentos que trabalham com altas vazões de vapor e praticamente todos eles possuem medições; no caso do coletor de VB, ocorre o oposto, já que há uma pulverização de equipamentos de baixas vazões e a maioria sem medição direta de vapor.

As planilhas de balanço apresentam ainda, em caráter informativo, as condições de pressões e temperaturas da situação estudada.

### 4.1.3 Diagramas do Sistema de Vapor

O modelo apresenta duas representações gráficas do sistema de vapor:

- **Diagrama Completo:** apresenta todas as saídas e entradas de vapor presentes no banco de dados dispostos entre os coletores. Permite a visualização da rede de vapor de uma forma sistêmica, incluindo as totalizações de vapor nas entradas e saídas de cada coletor. Pode ser utilizado no dia-a-dia da planta para visualizar o balanço de vapor e até durante emergências, permitindo a detecção de déficits de vapor (esta última aplicação deve ser utilizada com certo cuidado, uma vez que o modelo não é próprio para transientes).
- **Diagrama resumido:** apresenta de forma pictórica a representação dos componentes, agrupados de acordo com suas características em termos de consumo e /ou geração de vapor e em termos de aplicação no modelo de otimização como parâmetros fixos ou como variáveis manipuláveis. Apresenta a conveniência de uma visualização sumarizada e concentrada em apenas uma tela, dos principais componentes do sistema de vapor, como as turbinas de grandes máquinas, válvulas redutoras, alívios, fornos e caldeiras. A tela ainda apresenta a data da situação estudada e um balanço resumido dos coletores de vapor, incluindo os erros de balanço. Como será visto adiante, a exportação de informações para o modelo de otimização é organizada com base nesta divisão de equipamentos apresentada nesta tela. O ajuste do balanço também é realizado nesta tela. Isto é feito distribuindo os erros de forma conveniente, permitindo que as entradas dos coletores igualem à saída. Tais ajustes no modelo são sistematizados e feitos de forma automática nesta tela, baseados em premissas relacionadas com o conhecimento prévio de onde estão as maiores imprecisões, conforme descrito a seguir para cada coletor de vapor:

- Coletor de VS: Se a soma das saídas de VS é maior do que as entradas, o erro é atribuído à entrada, sendo que a diferença é distribuída proporcionalmente entre todos os produtores, corrigindo a informação na saída de cada um. No caso de maior entrada do que saída, a correção é realizada nas saídas fixas de vapor da rede. Desta forma, o erro

não é propagado para níveis inferiores e as correções representam ajustes do ponto de vista conservativo à rede de vapor;

- Coletor de VA: As diferenças entre entrada e saída totais de vapor deste coletor são atribuídas exclusivamente às saídas de vapor do sistema, evitando propagação de erros para coletores inferiores. O ajuste é aparentemente adequado, uma vez que estas saídas apresentam maiores dificuldades de estimativa de taxa de vapor;

- Coletor de VM: O erro de balanço também é atribuído às saídas de vapor do sistema, com as mesmas considerações relativas ao item anterior;

- Coletor de VB: O coletor de VB é o que apresenta os maiores erros (normalmente entre 5% e 10%). Isto é justificado pela escassez de medições de consumos de vapor disponíveis em SDCD, havendo necessidade de optar-se por expedientes mais imprecisos, como balanços de energia pelo lado de processo em permutadores, ou então informações de folhas de dados. Assim, de forma a não agregar grandes erros concentrados em um grupo específico de equipamentos, atribuiu-se erros a três fontes principais suspeitas de erro:

.Válvulas redutoras VM/VB: a informação de vazão destes equipamentos recebe um incremento de 15% durante o resgate de dados, como fator de correção. Como estas redutoras apresentam maior frequência de uso e com mais altas vazões relativas a seu projeto, é razoável considerar um certo desgaste no elemento primário após mais de 20 anos de operação. É importante mencionar que esta medida corrige também a saída de VM, já considerado no balanço anterior;

.Turbinas: no caso de turbinas com consideração de taxa de alimentação constante (valor de projeto), atribuiu-se um acréscimo de 10%. Da mesma forma, com o tempo de operação superior a 20 anos é razoável supor-se uma perda de eficiência por desgaste, o que direciona a correção desta forma.

É importante mencionar que estes dois procedimentos de ajuste acima corrigem as informações na própria base de dados das Planilhas dos Coletores, antes de ser

executado o cálculo de erro de balanço. Assim, não são considerados como correção de balanço, mas sim correção de informação.

.Saídas fixas de vapor: A diferença entre entrada e saída totais de vapor deste coletor que ainda existem, mesmo após a correção de informações, é atribuída às saídas fixas de vapor do sistema.

Assim, as correções são executadas na mesma tela resumida, sendo apresentados os valores corrigidos (em vermelho) que serão exportados para o módulo de otimização.

#### 4.1.4 Interfaces de Exportação

São planilhas dedicadas a tratar os dados resgatados e organizá-los de forma a subsidiar o modelo de otimização com os parâmetros necessários para representar as demandas da situação estudada. Basicamente duas planilhas executam estas tarefas:

- **Interface Alfa:** é formada por várias tabelas, com funções específicas.
  - Agrupamento, a partir dos dados resgatados, de todos os consumos fixos, representados por demandas da planta que devem ser atendidas e não são variáveis manipuláveis. Estes consumos fixos podem ser demandas de vapor para aquecimento (gerando condensado) ou demandas de trabalho em turbinas, sendo o vapor repassado para níveis inferiores.
  - Introdução manual de informações como custos de vapor e energia elétrica e de limites de geração ou compra de energia elétrica.
  - Troca de acionadores de equipamentos: como já foi mencionado, o modelo de otimização considerará variáveis binárias para seleção de quais acionadores, para determinados equipamentos, são mais adequados em cada situação estudada. Por exemplo, há 5 bombas de águas de alimentação de caldeiras e fornos com acionamento via motores elétricos e 3 bombas acionadas via turbinas a vapor. Todavia, a necessidade normal de operação é de 6 bombas. Tendo em vista a situação da central termoeletrica, a programação do módulo de otimização permite a seleção adequada de quais tipos de

acionadores tem maior conveniência para operação. A tabela referente a estes equipamentos agrupa e organiza informações resgatadas do banco de dados de equipamentos ou introduzidas manualmente, e define o número de máquinas, em cada conjunto, que devem operar, quais estão em manutenção (vale para equipamento ou seu acionador) e calcula o número de motores e turbinas operando e na reserva. Todas estas informações são necessárias ao modelo de otimização para que haja a seleção de acionadores, mas respeitando as exigências de equipamentos e as limitações reais como máquinas indisponíveis.

- Turbinas de dois estágios: estes equipamentos (que possuem variáveis manipuláveis) exigiram modelagens específicas, lineares, para representar seu comportamento no modelo de otimização. Esta formulação será apresentada adiante, com a característica de que os parâmetros das equações, para as turbinas de Processo 1 e 2, dependem da potência gerada das máquinas, sendo definidos intervalos de potência onde os parâmetros podem ser considerados constantes. Assim, esta tabela resgata informações do banco de dados para cada turbina de dois estágios de Processo 1 e 2, calcula a potência gerada e, a partir de tabelas disponíveis para cada máquina, resgatam-se os parâmetros que representam adequadamente a situação estudada. Para os turbogeradores, os parâmetros podem ser considerados constantes dentro do intervalo de operação, com boa precisão. Mesmo assim, os parâmetros encontram-se centralizados na tabela das turbinas de dois estágios, podendo ser alterados manualmente, se for necessário usar novos parâmetros.

- Consumo de energia elétrica: esta tabela resgata diretamente do SDCD as gerações de energia elétrica nos dois turbogeradores a vapor e na turbina a gás e a compra de energia a partir da rede externa, pela medição de potência nos dois alimentadores existentes na empresa. A soma de todas estas medições indica a potência elétrica total consumida na empresa.

- Potência total de motores em operação: esta tabela totaliza as potências elétricas de motores em operação e pertencentes ao conjunto de equipamentos onde pode haver troca de acionadores (ou seja, de motores que podem ser substituídos por

turbinas). A diferença entre a potência total consumida pela empresa e a potência demandada por estes motores fornece o consumo fixo de energia elétrica que deve ser atendido.

- **Interface Intermediária:** na prática, é uma extensão da interface alfa. Foi incorporada devido à necessidade de introdução manual de informações sobre o estado de operação de equipamentos e verificação se a situação estudada encontra-se no horário de verão, horário de ponta ou horário normal.
- **Interface Beta:** a interface beta resgata da interface alfa (incluindo a interface intermediária) todos os dados necessários para suprir o modelo de otimização com parâmetros que definem a situação estudada. Todas as informações estão dispostas em uma tabela de apenas duas colunas, sendo que a primeira indica o nome do parâmetro, que constará na formulação do modelo de otimização e a segunda coluna indica o valor atribuído a este parâmetro. O próximo passo envolve a conversão desta planilha (interface beta) no formato adequado para plataforma de otimização GAMS. A conversão é realizada através de um software de domínio público, chamado XLS2GMS.

## 4.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DO SISTEMA TERMOELÉTRICO

O modelo de otimização foi programado em plataforma GAMS, buscando representar a rede termoelétrica da Indústria estudada, a partir da formulação dos balanços de massa e energia dos coletores de vapor e dos balanços nos equipamentos que possuem variáveis manipuláveis, agregando ainda os parâmetros importados da planilha de cálculo da rede de vapor e as restrições de capacidade.

Todos os equipamentos envolvidos são classificados quanto a sua formulação como fixos ou manipuláveis. Equipamento fixo é aquele para o qual o consumo ou produção de utilidades é determinado "*a priori*", dependendo da carga da área operacional a qual ele pertence. Sendo assim, não envolvem variáveis livres. Equipamento manipulável é aquele que atende a demanda energética dos equipamentos

fixos, sendo que sua formulação envolve variáveis livres. São formulados a partir de equações lineares, cujos parâmetros podem ser importados a partir da planilha de cálculo, permitindo que o módulo de otimização calcule em que nível ele deve operar, se operar (Pereira, 1999). Dentro dos equipamentos manipuláveis, também são incluídos aqueles formulados a partir de variáveis binárias que permitem selecionar seu estado de operação – ligado ou desligado.

A função objetivo do modelo de otimização, por sua vez, envolve a redução do custo total de vapor e energia elétrica, trabalhando apenas nos seguintes componentes: vazão de vapor em equipamentos manipuláveis; fontes de produção de energia elétrica; e potência elétrica demandadas em equipamentos que possuem acionamento turbinado. Os custos específicos de vapor e energia elétrica são parâmetros a serem importados da planilha de cálculo da rede de vapor.

#### **4.2.1 Formulação da rede termoelétrica**

A programação do sistema envolve cerca de 170 variáveis que podem ser classificadas a partir das correntes envolvidas, que por sua vez podem também ser caracterizadas de acordo com sua função, por índices. A Lista de Símbolos e Abreviaturas (página iii) discrimina os índices e variáveis utilizados na formulação genérica da Rede Termoelétrica da Indústria estudada. É importante ressaltar a convenção de que letras maiúsculas representam variáveis manipuláveis e minúsculas representam parâmetros fixos, importados da planilha de cálculo da rede de vapor.

Como já foi mencionado, a função objetivo visa a minimização do custo total da Unidade Termoelétrica relacionado aos consumos de vapor e energia elétrica. Na proposta deste trabalho, não há busca pela otimização do custo específico da energia gerada. Parte-se da premissa de que as reduções ou aumentos de vapor são acompanhados por reduções e aumentos dos combustíveis, mantendo a matriz de combustíveis (ou seja, mantendo a mesma proporção de combustíveis consumidos antes

da otimização), de forma a manter o custo específico do vapor e energia elétrica gerada internamente. Assim, os custos específicos são parâmetros, e não variáveis.

A função objetivo envolve a minimização de custos, sendo estes compostos por:

- Custo total de vapor gerado nas caldeiras de Utilidades;
- Custo total de energia elétrica gerada nos turbogeradores a vapor;
- Custo total de energia elétrica gerada na turbina a gás;
- Custo total de energia elétrica comprada, incluindo tarifa T aplicada ao montante contratado (25MW) durante horário de ponta, se houver importação ( $z_{ponta}=1$ );
- Custo total do uso de redutoras de vapor. Definido como a diferença entre os custos específicos de vapor (parâmetros disponíveis na empresa e introduzidos manualmente na planilha de cálculo da rede de vapor) dos coletores entre os quais as respectivas redutoras estão instaladas. Assim, por exemplo, o custo do vapor consumido em redutora VA/VM é igual à diferença dos custos específicos de VA e VM, multiplicada pela vazão de vapor na entrada da redutora.

Assim:

$$\text{Min } CO = \text{Min} \left[ \sum_{h=1}^{Nh} (co_h \cdot VS_h)_{caldeiras} + \sum_{ps=1}^{Nps} co_{ps} \cdot PO_{ps} + \sum_{ld=1}^{Nld} co_{ld} \cdot V_{ld} \right] \quad (33)$$

Onde,

$$\sum_{ld=1}^{Nld} co_{ld} \cdot V_{ld} = \left[ \sum_{ld=1}^{Nld} (co_h - co_i) V_{ld} \right]_{VS/VA} + \left[ \sum_{ld=1}^{Nld} (co_i - co_j) V_{ld} \right]_{VA/VM} + \left[ \sum_{ld=1}^{Nld} (co_j - co_k) V_{ld} \right]_{VM/VB} \quad (34)$$

$$\sum_{ps=1}^{Nps} co_{ps} \cdot PO_{ps} = [co_{ps} \cdot PO_{ps}]_{7TG1} + [co_{ps} \cdot PO_{ps}]_{7TG2} + [co_{ps} \cdot PO_{ps}]_{77TG1} + [co_{ps} \cdot PO_{ps} + z_{ponta} \cdot T \cdot 25]_{import} \quad (35)$$

e,

$$(VS_h)_{caldeiras} = VS_h - (vs_h)_{fornos} + (VS_h)_{77TG1 < 30MW} \quad (36)$$

A equação (36) contabiliza a quantidade de vapor gerada nas caldeiras, igual ao total de VS demandado menos a produção dos fornos de pirólise, mais uma última parcela que contabiliza a necessidade de geração adicional de vapor nas caldeiras da central termoeletrica devido ao fato da turbina a gás operar com uma produção elétrica menor do que 30 MW (geração normal da turbina a gás) - neste caso, também haverá menor recuperação de calor para água de alimentação dos fornos de pirólise da planta de Processo 2, o que reduz a

produção de vapor nestes fornos e força uma produção adicional de VS nas caldeiras de utilidades para equilibrar a demanda. Esta última parcela é estimada a partir da relação entre potência gerada na turbina a gás e calor recuperado no economizador, sob a forma de água aquecida para alimentação de fornos de pirólise da planta de Processo 2, que pode ser observada na Figura 11.

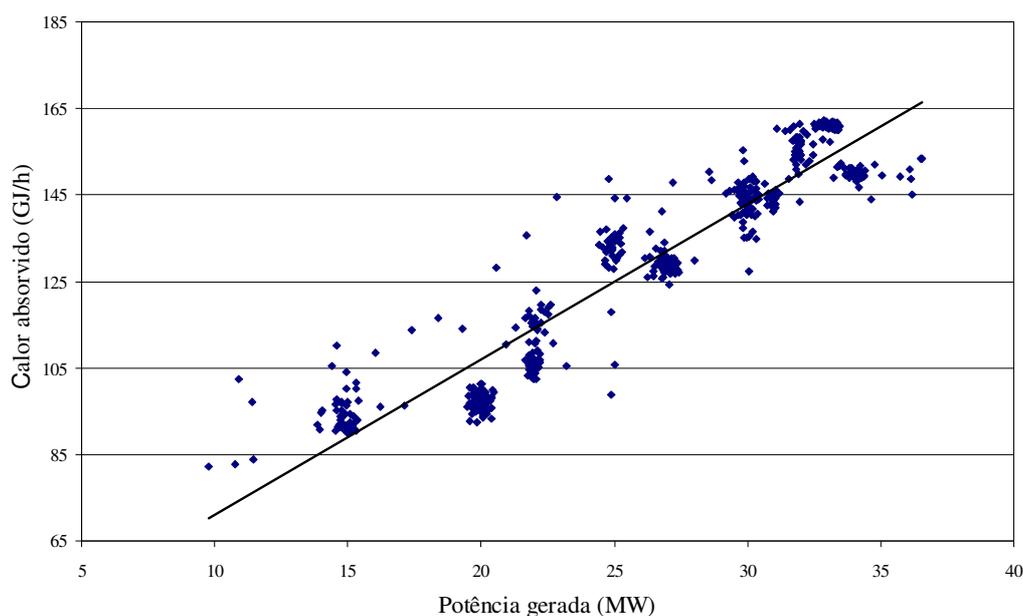


Figura 11: Gráfico de pontos experimentais de calor absorvido no economizador e potência gerada na turbina a gás.

$$Q_{abs}(PO_{77TG1}) = 3,5989PO_{147TG01} + 34,913 \text{ [GJ/h]} \quad (36a)$$

A equação acima foi obtida a partir do gráfico na Figura 11 e apresentou  $R^2 = 0,887$ , adequado para a precisão desejada na função objetivo. Este conjunto de pontos foi obtido a partir das informações da turbina a gás disponíveis em SDCCD:

- Calor absorvido: calculado a partir da vazão e das temperaturas de entrada e saída de água do economizador da turbina a gás;
- Potência gerada: medição da turbina a gás disponível diretamente em SDCCD;

Desta forma, no caso da turbina gerar uma potência elétrica menor do que 30 MW, será necessária a seguinte geração adicional de energia nas caldeiras de utilidades:

$$\text{Geração Adicional [GJ/h]} = Q_{abs}(30) - Q_{abs}(PO_{77TG1}) \quad (36b)$$

Assim, aplicando a relação acima e a entalpia do vapor de super alta pressão (3,4248 GJ/t) a última parcela da equação (36) pode ser representada por:

$$(VS_h)_{77TG1 < 30MW} = \frac{3,5989(30 - PO_{77TG1})}{3,4248} \quad (36c)$$

A equação (36) pode ser assim reescrita:

$$(VS_h)_{caldeiras} = VS_h - (vs_h)_{fornos} + 1,051(30 - PO_{77TG1}) \quad (36d)$$

Assim, se a geração elétrica na turbina a gás for superior a 30 MW, a temperatura do BFW fornecido para fornos de Processo 2 será mais alta, levando a uma maior produção de vapor nestes fornos e reduzindo a necessidade de geração nas caldeiras da unidade de utilidades.

Definida a função objetivo, é necessário estabelecer suas restrições. As restrições de igualdade são formadas essencialmente pelas equações de balanço de massa. Como as condições nos coletores de vapor são controladas, assume-se que o estado do vapor nos quatro coletores é constante na faixa de operação normal.

O sistema de vapor analisado engloba as entradas de vapor produzido nas fontes e as saídas de vapor da rede, independente do destino, como visto na Figura 3, item 3.2. Todas as entradas (VS gerado e AD injetado nas válvulas redutoras) atendem todas as saídas, sejam vapor exausto das turbinas de condensação-contrapressão (que corresponde à vazão de condensado de vácuo na saída dos condensadores de superfície), alívios de VS ou de VB, injeções direta em processos, consumos de vapor em permutadores onde há condensação do mesmo, perdas ou exportações para empresas externas. O balanço de massa global do sistema de vapor pode ser expresso como:

$$\sum_{h=1}^{Nger} VS_h + \sum_{ld=1}^{Nred} AD_{ld} = \sum_{l=1}^{Nger} CV_e + \sum_{t=1}^{Naliv} VS_t + \sum_{oc=1}^{Ncons} vs_{oc} + \sum_{pc=1}^{Ncons} va_{pc} + \sum_{qc=1}^{Ncons} vm_{qc} + \sum_{rc=1}^{Ncons} vb_r + \sum_{u=1}^{Naliv} VB_u \quad (37)$$

Onde,

$$\sum_{ld=1}^{Nred} AD_{ld} = \sum_{ld=1}^{Nred} (VA_{ld} - VS_{ld})_{VS/VA} + \sum_{ld=1}^{Nred} (VM_{ld} - VA_{ld})_{VA/VM} + \sum_{ld=1}^{Nred} (VB_{ld} - VM_{ld})_{VM/VB} \quad (38)$$

Por outro lado, os balanços envolvendo entradas e saídas dos coletores de vapor são formulados da seguinte forma:

- Coletor de vapor de super alta pressão:

$$\sum_{h=1}^{Nger} VS_h = \sum_{o=1}^{Ncons} VS_o + \sum_{i=1}^{Nativ} VS_i + \sum_{oc=1}^{Ncons} vS_{oc} \quad (39)$$

onde,

$$\sum_{h=1}^{Nger} VS_h = \left( \sum_{h=1}^{Nger} vS_h \right)_{Olef1} + \left( \sum_{h=1}^{Nger} vS_h \right)_{Olef2} + \left( \sum_{h=1}^{Nger} VS_h \right)_{Util} \quad (40)$$

e,

$$\begin{aligned} \sum_{o=1}^{Ncons} VS_o = & (vS_o)_{2TBC1} + (vS_o)_{2TBC21} + (VS_o)_{4TBC1} + (VS_o)_{4TBC21} + (VS_o)_{7TBC1} + (VS_o)_{7TBC2} + \\ & + (VS_o)_{22TBC1} + (VS_o)_{1PV51} + (VS_o)_{6PV12} \end{aligned} \quad (41)$$

e,

$$\sum_{i=1}^{Nativ} VS_i = (VS_o)_{6PV24} + (VS_o)_{6PV25} \quad (42)$$

- Coletor de vapor de alta pressão:

$$\sum_{i=1}^{Nger} VA_i = \sum_{p=1}^{Ncons} VA_p + \sum_{pc=1}^{Ncons} va_{pc} \quad (43)$$

onde

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{Nger} VA_i = & (va_i)_{2TBC1} + (va_i)_{2TBC21} + (VA_i)_{7TBC1} + (VA_i)_{22TBC1} + (VA_i)_{7TBC2} + \\ & + (VA_i)_{6PV12} + (VA_i)_{1PV51} \end{aligned} \quad (44)$$

e

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^{Ncons} VA_p = & (VA_p)_{1PV52} + (VA_p)_{6PV13} + \left( \sum_{p=1}^{Ncons} va_p \right)_{turbinas\_VA/VM} + \left( \sum_{p=1}^{Ncons} va_p \right)_{turbinas\_VA/VB} + \\ & + \left( \sum_{p=1}^{Ncons} VA_p \right)_{turbinas\_VA/VM} + \left( \sum_{p=1}^{Ncons} VA_p \right)_{turbinas\_VA/VB} \end{aligned} \quad (45)$$

O segundo par de variáveis acima refere-se aos consumos de VA em turbinas VA/VB e VA/VM cujo consumo é fixo, ao contrário do último par, que representa equipamentos cujo consumo de VA é variável manipulada.

- Coletor de vapor de média pressão:

$$\sum_{j=1}^{Nger} VM_j = \sum_{q=1}^{Ncons} VM_q + \sum_{qc=1}^{Ncons} vm_{qc} \quad (46)$$

onde

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{Nger} VM_j = & (VM_j)_{4TBC1} + (VM_j)_{4TBC21} + (VM_j)_{22TBC1} + (VM_j)_{1PV52} + (VM_j)_{6PV13} + \\ & + \left( \sum_{p=1}^{Ncons} VA_p \right)_{turbinas\_VA/VM} + \left( \sum_{p=1}^{Ncons} va_p \right)_{turbinas\_VA/VM} \end{aligned} \quad (47)$$

$$\sum_{q=1}^{Ncons} VM_q = (VM_q)_{1PV13} + (VM_q)_{6PV14} + \left( \sum_{q=1}^{Ncons} VM_q \right)_{turbinas\_VM/VB} + \left( \sum_{q=1}^{Ncons} vm_q \right)_{turbinas\_VM/VB} \quad (48)$$

e

$$\sum_{qc=1}^{Nger} VM_{qc} = (VM_q)_{turbinas\_VM/atm} + \sum_{j=1}^{Ncons} vm_{qc} \quad (49)$$

- Coletor de vapor de baixa pressão:

$$\sum_{k=1}^{Nger} VB_k = \sum_{r=1}^{Ncons} vb_r + \sum_{u=1}^{Naliv} VB_u \quad (50)$$

Onde

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{Nger} VB_k = & (VM_k)_{1PV13} + (VM_k)_{1PV14} + \left( \sum_{p=1}^{Ncons} VA_p \right)_{turbinas\_VA/VB} + \left( \sum_{j=1}^{Ncons} VM_j \right)_{turbinas\_VM/VB} + \left( \sum_{p=1}^{Ncons} va_p \right)_{turbinas\_VA/VB} + \\ & + \left( \sum_{j=1}^{Ncons} vm_j \right)_{turbinas\_VM/VB} + \left( \sum_{oc=1}^{Ncons} vs_{oc} \right)_{turbinas\_VS/VB} + \left( \sum_{k=1}^{Ncons} vb_k \right)_{flash\_condensado} \end{aligned} \quad (51)$$

e

$$\sum_{u=1}^{Naliv} VB_u = (VB_u)_{1PV14} + (VB_u)_{6V26} + (VB_u)_{11PV1} \quad (52)$$

O balanço de condensado de vácuo, gerados nas turbinas das grandes máquinas fornece:

$$\sum_{l=1}^{N_{ger}} CV_e = (cv_e)_{2TBC1} + (cv_e)_{2TBC21} + (CV_e)_{4TBC1} + (CV_e)_{4TBC21} + (CV_e)_{7TG1} + (CV_e)_{7TG2} \quad (53)$$

É importante mencionar que, nos balanços de VS, VA e VM, os consumos fixos de vapor para fins térmicos já incluem implicitamente a parcela que é condensada e que gerará VB nos vasos de *flash*. A parcela de VB gerada via *flash*, no entanto, aparece explicitada na sua linha, valor importado da Planilha de Balanço. A necessidade de explicitar o balanço de condensado de vácuo surge do fato de que esta é uma variável dependente dos balanços nas turbinas de extração-condensação modeladas. Os demais condensados são valores fixos, equivalentes aos consumos de vapor utilizados exclusivamente nas necessidades de calor, que envolvem vapor condensante.

O balanço das redutoras de vapor é formulado no modelo de otimização de forma similar ao executado no modelo da rede termoelétrica, considerando a fração de AD do borribo de 6,8 %, 6,1 % e 6,8 % de VS/VA, VA/VM e VM/VB, respectivamente. Assim,

$$(VS_o)_{1PV51} = 0,932.(VA_i)_{1PV51} \quad (54)$$

$$(VS_o)_{6PV12} = 0,932.(VA_i)_{6PV12} \quad (55)$$

$$(VA_p)_{1PV52} = 0,939.(VM_j)_{1PV52} \quad (56)$$

$$(VA_p)_{6PV13} = 0,939.(VM_j)_{6PV13} \quad (57)$$

$$(VM_q)_{1PV13} = 0,932.(VB_k)_{1PV13} \quad (58)$$

$$(VM_q)_{6PV14} = 0,932.(VB_k)_{6PV14} \quad (59)$$

$$(VM_q)_{11PV4} = 0,932.(VB_k)_{11PV4} \quad (60)$$

#### 4.2.2 Modelagem de Turbinas de Dois Estágios

Parte fundamental do modelo de otimização, a modelagem das turbinas envolve a definição das equações de balanço e de performance das máquinas.

#### 4.2.2.1 Equações de Balanço

Definem as relações entre as vazões de vapor de entrada e saída das turbinas de dois estágios. Assim,

7TBG1/2

$$(VS_o)_{7TBG1} = (VA_i)_{7TBG1} + (CV_l)_{7TBG1} \quad (61)$$

$$(VS_o)_{7TBG2} = (VA_i)_{7TBG2} + (CV_l)_{7TBG2} \quad (62)$$

4TBC1/21

$$(VS_o)_{4TBC1} = (VM_j)_{4TBC1} + (CV_l)_{4TBC1} \quad (63)$$

$$(VS_o)_{4TBC21} = (VM_j)_{4TBC21} + (CV_l)_{4TBC21} \quad (64)$$

22TBC1

$$(VS_o)_{22TBC1} = (VA_i)_{22TBC1} + (VM_j)_{22TBC1} \quad (65)$$

2TBC1/21

$$(VS_o)_{2TBC1} = (va_i)_{2TBC1} + (CV_l)_{2TBC01} \quad (66)$$

$$(VS_o)_{2TBC21} = (va_i)_{2TBC21} + (CV_l)_{2TBC21} \quad (67)$$

#### 4.2.2.2 Equações de Performance

A modelagem da operação a partir das linhas de Willans foi aplicada às turbinas da Indústria estudada que apresentam variáveis manipuláveis e assim, apresentam potenciais de otimização dentro do sistema estudado. Enquadram-se nesta premissa as turbinas de duplo estágio (com extração) e cujo ponto de operação ainda encontra-se em região com flexibilidade para transitar pelas linhas de Willans, sem, no entanto comprometer a carga exigida.

Hoje se observa que as turbinas dos compressores de gás craqueado das plantas de Processo 1 e 2 operam muito próximo às condições limite das máquinas (ou seja,

muito próximas do ponto D da Figura 2 (item 2.2), limitada pelas restrições construtivas das turbinas). A turbina de gás craqueado da unidade de Processo 2 (22TBC1), entretanto, seria substituída por outra de maior capacidade (passando de 23 MW para 31 MW e com maior vazão de contrapressão em VM) a partir de dezembro de 2005, permitindo que o ponto de operação futuro encontre-se menos restringido pelos limites máximos e assim com maior flexibilidade operacional.

Assim, este trabalho considera como graus de liberdade as cinco seguintes turbinas: 7TBG1/2, 4TBC1/21 e 22TBC1. Em relação a esta última, foram criados dois modelos, representando a turbina antes e após a substituição ocorrida em novembro de 2005, período de parada geral de manutenção da Unidade de Processo 2 (PGM-2005). Apesar da pouca flexibilidade da 22TBC1 antes da PGM-2005, esta foi incluída especialmente pela característica de ser a única turbina de extração e contrapressão, diferente das demais turbinas de duplo estágio, que envolvem condensação. É assim, um equipamento mais eficiente em termos de sistema de cogeração.

Além da 22TBC1, outras turbinas de simples estágio também foram substituídas durante a PGM-2005: a turbina de bomba de nafta (11TBB01 B) e a turbina de bomba de óleo de quench (11TBB07 B) foram substituídas por modelos com maior capacidade e sua alimentação de vapor foi alterada de VA para VM, permanecendo a contrapressão em VB; o modelo pós PGM-2005 também abarca estas alterações.

Finalmente, os turbocompressores 2TBC1/21 não contém na prática graus de liberdade não só por estarem operando em condições muito próximas aos seus limites construtivos, mas também por ser uma preferência da unidade de Processo 1 evitar alterações na configuração das vazões de vapor operacionais para estas turbinas a fim de evitar oscilações na carga de processo – estas máquinas hoje inclusive estão fora do controlador principal de VA.

Para as turbinas otimizáveis, estão disponíveis na empresa os diagramas de capacidade, construídos pelo próprio fabricante dos equipamentos. Espera-se que estes diagramas representem com boa precisão as turbinas dos turbogeradores da unidade de Utilidades, já que estas operam em rotação constante – os diagramas de capacidade são fornecidos a uma dada rotação e que no caso dos 7TBG1/2 é a mesma rotação constante

na qual estas máquinas operam. Para as demais turbinas de Processo 1 e 2, no entanto a rotação é variável de forma a controlar a pressão de sucção dos compressores acoplados. Assim, a aplicação do diagrama de capacidade, fornecido a apenas uma rotação para as máquinas de Processo 1 e 2, pode levar a erros que impossibilitem a aplicação prática do modelo de otimização. Outra diferença importante do diagrama de capacidade das turbinas de turbogeradores para as turbinas de compressores diz respeito à variável potência gerada. No caso dos turbogeradores, o diagrama de capacidade já apresenta a potência gerada nos terminais do gerador, o que também é facilmente verificado na prática, tendo em vista haver medição da potência elétrica gerada. Já nas máquinas de Processo 1 e 2, o diagrama de capacidade é fornecido relacionando o consumo de vapor de alimentação versus a potência de eixo, que não é medida na prática.

A formulação utilizada, consistiu em buscar uma regressão linear multivariável baseada em dados reais e recentes, e que incluía a rotação na modelagem, no caso das máquinas de Processo 1 e 2. Como as turbinas dos turbogeradores de utilidades possuem mais de 20 anos de operação, podendo ter sofrido algum desgaste natural que altere sua eficiência, também se considerou a regressão de novas curvas baseada em dados práticos e recentes, mas sem a necessidade de inclusão da rotação.

Assim, foram resgatados valores reais diários, sempre às 15:00, de 1/10/2004 a 18/4/2005. Apesar de não haver nenhuma justificativa obrigatória para a seleção deste horário, o mesmo é conveniente por estar próximo da troca de turno (16:00), quando manobras são minimizadas e também por ser fora do horário de ponta, onde outras manobras podem ser realizadas nos 7TBG1/2 para o ajuste da configuração elétrica. A coleta fez pouco mais de seis meses, realizada basicamente durante os meses mais quentes, o que é conveniente, uma vez que inclui implicitamente no conjunto de dados as limitações de modos de operação devido a temperaturas mais altas na água de resfriamento (inclui assim eventuais limitações nos condensadores de superfície). Assim, as máquinas são modeladas de forma mais conservativa do que se fosse considerada uma média anual. Apesar de não necessariamente serem observadas nestes períodos cargas máximas de operação das plantas, a modelagem permite a sua aplicação em cargas maiores, como será visto adiante.

#### 4.2.2.3 Modelagem das Turbinas de Turbogeneradores a Vapor

A modelagem aplica a seguinte formulação aos 7TBG1/2:

$$VA_i = vVS_o + pPO_{ps} + c \quad (68)$$

Onde a potência  $PO_{ps}$  refere-se à potência elétrica produzida no gerador.

A regressão dos parâmetros foi obtida através de um software disponível comercialmente, chamado *Regression Forecast*, que permite aplicar cerca de 100 conjuntos de variáveis. Assim, foi realizada uma amostragem aleatória de 100 conjuntos  $\{VA_i, VS_o, PO_{ps}\}$ , para cada uma das turbinas. A partir da regressão, obtiveram-se os parâmetros da equação (68), conforme Tabela 7.

É importante lembrar que o trabalho proposto envolve não apenas a otimização do uso de vapor, mas também propõe ajustar de forma racional a configuração da geração de energia elétrica. Portanto, como turbogeneradores da unidade de utilidades também são fontes de energia elétrica dentro da Indústria estudada, a potência produzida PO é uma variável de balanço, a ser manipulada pelo otimizador.

TABELA 7: Parâmetros das turbinas dos turbogeneradores, ajustados a partir de pontos experimentais

Turbina	$v$	$p$	$c$	Erro médio no cálculo do VA (%)
7TBG1	1,306	-5,284	-9,839	2,9
7TBG2	1,361	-5,015	-20,672	1,8

#### 4.2.2.4 Modelagem das turbinas de compressores de Processo 1

A modelagem aplica a seguinte formulação aos 4TBC1/21:

$$VM_j = v_{f-g}VS_o + q_{f-g}ro + c_{f-g}, \text{ válido para } f[\text{MW}] < PO < g[\text{MW}] \quad (69)$$

Sendo 'PO' a potência de eixo, calculada através de balanço de energia e sendo 'ro' a rotação da turbina em rpm x  $10^3$ . Assim, para diversos intervalos de potência de

eixo foram regredidos conjuntos de parâmetros que permitem o equacionamento dentro de uma faixa de precisão aceitável.

A potência de eixo é verificada a partir do seguinte equacionamento:

$$PO = \bar{h}_{VS} \cdot VS_o - \bar{h}_{VM} \cdot VM_j - \bar{h}_{Exausto} \cdot (VS_o - VM_j), \text{ para os 4TBC1/21} \quad (70)$$

onde os valores das entalpias são dados na Tabela 8.

TABELA 8

Entalpias de VS, VM e vapor exausto para as turbinas dos compressores de propeno refrigerante da planta de Processo 1

	$\bar{h}_{VS}$ (kJ/kg)	$\bar{h}_{VM}$ (kJ/kg)	$\bar{h}_{Exausto}$ (kJ/kg)
4TBC1	3409	3035	2390
4TBC21	3409	3024	2392

Assim, aplicando regressão linear multivariável, obteve-se o conjunto de parâmetros apresentado na Tabela 9. Como a modelagem de cada turbina de Processo 1 envolve diferentes equacionamentos para diferentes faixas de potência de eixo, a implementação foi realizada de forma diferente às turbinas de Utilidades. Na interface Alfa, presente na planilha de cálculo da rede de vapor, a partir das informações de vazões de vapor e rotação das turbinas resgatadas no banco de dados, são calculadas as potências de eixo, via balanço de energia como descrito na Equação (70). Os valores obtidos são então comparados com as faixas de potência tabelada que apresentam os conjuntos de parâmetros conforme a Tabela 9. Assim, os parâmetros exportados para o módulo de otimização (GAMS) já são adequados para a potência de operação exigida em cada situação estudada, com a conveniência de manter a linearidade e sem necessidade de linhas condicionais na programação do GAMS.

TABELA 9: Parâmetros das equações das turbinas dos compressores de propeno refrigerante da planta de Processo 1

	PO (MW)	$v$	$q$	$c$	Erro médio no cálculo da vazão de Alimentação (%)
4TBC1	PO < 22	1,47	-3,839	-90,774	0,76
	22 < PO < 23	1,556	-4,829	-102,816	0,63
	23 < PO < 24	1,447	-15,035	-50,216	0,65
	PO > 24	1,096	-27,117	43,8	0,74
4TBC21	PO < 19	1,724	-23,236	-20,658	0,83
	19 < PO < 20	1,664	-15,666	-51,019	0,77
	20 < PO < 21	1,601	-15,442	-49,792	0,65
	PO > 21	1,517	-20,06	-25,046	0,66

#### 4.2.2.5 Modelagem da turbina do compressor de gás craqueado de Processo 2

Para o 22TBC1 foram aplicadas duas modelagens, representando sua situação antes e após a substituição da turbina, na PGM-2005. Os procedimentos para modelagem foram diferentes para cada situação.

Para a turbina pré PGM-2005 foram utilizadas as informações da curva do fornecedor, uma vez que os dados experimentais perfazem apenas uma pequena área da região de operação da máquina. Neste caso a modelagem aplica a seguinte formulação ao 22TBC1:

$$VS_o = vVA_i + qPO + c \quad (71)$$

Sendo PO a potência de eixo, calculada através de balanço de energia.

$$PO = \bar{h}_{VS} \cdot VS_o - \bar{h}_{VA} \cdot VA_i - \bar{h}_{VM} \cdot (VS_o - VA_i) \quad (72)$$

Onde os valores das entalpias são apresentados na Tabela 10.

TABELA 10: Entalpias de VS, VA e VM para as turbinas do compressor de gás craqueado da planta de Processo 2

	$\bar{h}_{VS}$ (kJ/kg)	$\bar{h}_{VA}$ (kJ/kg)	$\bar{h}_{VM}$ (kJ/kg)
22TBC1	3409	3186	3029

Para a turbina pós PGM-2005, com o aumento de potência instalada, houve a ampliação da região de operação considerando a carga de processo da planta de Processo 2. Assim, foi possível conduzir uma regressão linear baseando-se na variabilidade de dados existente, representando mais adequadamente a região, valendo a seguinte formulação:

$$VS_o = vVA_i + q.ro + c, \quad (73)$$

Sendo 'ro' a rotação da turbina em  $10^3$  rpm.

Aplicando regressão linear multivariável obteve-se o conjunto de parâmetros para ambas as situações da 22TBC1 apresentado na Tabela 11:

TABELA 11: Parâmetros das equações da turbina do compressor de gás craqueado da planta de Processo 2

	<i>Situação</i>		<i>v</i>	<i>q</i>	<i>c</i>	Erro médio no cálculo da vazão de alimentação (%)
22TBC1	Antes de 10 de novembro	PO<20MW	2,913	-22,575	-142,878	-
		PO>20MW	1,6	-17,959	98,18	1,4
	Após de 10 de dezembro		0,527	73,504	-160,487	2

### 4.2.3 Modelagem dos Equipamentos com Possibilidade de Seleção de Acionador

A Equação (74) fornece a definição da potência elétrica total a partir das medições das fontes. Todavia, é necessário também definir a potência elétrica total a partir dos consumos, que são compostos por duas principais parcelas: total de consumos fixos, parâmetro dependente basicamente das cargas de processo e os consumos de equipamentos motorizados que podem ser substituídos por máquinas turbinadas, com envolvimento de variável binária 'z'. Assim,

$$\sum_{ps=1}^{Nps} PO_{ps} = (PO_{ps})_{47TG01} + (PO_{ps})_{47TG02} + (PO_{ps})_{147TG01} + (PO_{ps})_{import} \quad (74)$$

e

$$\sum_{ps=1}^{Nps} PO_{ps} = \sum_{pf=1}^{Npf} po_{pf} + \sum_{ms=1}^{Nms} z_{ms} \cdot s_{ms} \cdot PO_{ms} \quad (75)$$

Sendo que  $ms = \{6MB4B, 8MB51C, 88MB2A, 6MVT1, 6MVT2A, 6MVT3A, 6MVT3B, 6MVT4A, 6MVT4B, 6MVT5A, 6MVT5B, 1MB6C, 6MB1A, 6MB1C, 6MB1F, 66MB1G, 66MB1H, 9MC1A, 9MC1B, 99MC2A, 99MC2B, 88MB1C, 88MB1D, 88MB1E, 148MB01F, 88MB1G, 74MB1A, 74MB1B\}$ .

Da mesma forma, é possível equacionar as parcelas de consumo de vapor de turbinas cambiáveis por motores e associadas a variáveis binárias, presentes nas Equações (76) a (79), incluindo parcela para contabilização de passagem mínima de vapor para aquecimento ( $0,5 \text{ t.h}^{-1}$ ), no caso de fora de operação.

$$\left( \sum_{p=1}^{Ncons} VA_p \right)_{turbinas\_VA/VM} = \left( \sum_{ts=1}^{Nts} z_{ts} s_{ts} VA_{ts} \right)_{turbinas\_VA/VM} + \left( \sum_{ts=1}^{Nts} (1 - z_{ts}) s_{ts} 0,5 \right)_{turbinas\_VA/VM} \quad (76)$$

Sendo que neste caso  $ts_{turbinas\_VA/VM} = \{6TBVT1, 6TBVT2A, 6TBVT2B, 6TBVT03A, 46TBVT3B, 6TBVT4A, 6TBVT4B, 6TBVT5A, 6TBVT5B, 1TBB6A\}$ .

$$\left( \sum_{p=1}^{Ncons} VA_p \right)_{turbinas\_VA/VB} = \left( \sum_{ts=1}^{Nts} z_{ts} s_{ts} VA_{ts} \right)_{turbinas\_VA/VB} + \left( \sum_{ts=1}^{Nts} (1 - z_{ts}) s_{ts} 0,5 \right)_{turbinas\_VA/VB} \quad (77)$$

Sendo que neste caso  $ts_{turbinas\_VA/VB} = \{6TBB1B, 6TBB01D, 6TBB1E, 9TBC1C, 88TBB1A, 88TBB1B\}$ .

$$\left( \sum_{p=1}^{Ncons} VM_j \right)_{turbinas\_VM/VB} = \left( \sum_{ts=1}^{Nts} z_{ts} s_{ts} VM_{ts} \right)_{turbinas\_VM/VB} + \left( \sum_{ts=1}^{Nts} (1 - z_{ts}) s_{ts} 0,5 \right)_{turbinas\_VM/VB} \quad (78)$$

Sendo que neste caso  $ts_{turbinas\ VM/VB} = \{6TBB4A, 8TBB51B, 88TBB2B\}$ .

$$(VM_j)_{turbina\_VM/atm} = (z_{ts} s_{ts} VM_{ts})_{turbina\_VM/atm} + ((1 - z_{ts}) s_{ts} 0,5)_{turbina\_VM/atm} \quad (79)$$

Sendo que neste caso  $ts_{turbina\ VM/atm} = \{74TBB1C\}$ .

Também é preciso fornecer a informação do número de equipamentos (que possuem acionadores cambiáveis) que devem operar para atender às necessidades dos diversos processos aos quais fazem parte. O parâmetro ‘n’ – número de equipamentos – é assim resgatado a partir da planilha de cálculo da rede de vapor (interface alfa) para todos estes equipamentos e a formulação no modelo que restringe o número de equipamentos envolve duas equações:

$$n_{equip} = \left( \sum_{ts=1}^{Nts} z_{ts} \right)_{equip} + \left( \sum_{ms=1}^{Nms} z_{ms} \right)_{equip} \quad (80)$$

e também , incluindo as indisponibilidades por manutenção

$$n_{equip} = \left( \sum_{ts=1}^{Nts} z_{ts} \cdot s_{ts} \right)_{equip} + \left( \sum_{ms=1}^{Nms} z_{ms} \cdot s_{ms} \right)_{equip} \quad (81)$$

Sendo que  $equip = \{6B4, 8B51, 88B2, 6VT1, 6VT2A, 6VT3A, 6VT3B, 46VT4A, 6VT4B, 6VT5A, 6VT5B, 1B6, 6B1, 66B1, 9C1, 99C2, 88B1, 74B1\}$

O sistema formado pelas equações (80) e (81) permite que sejam selecionados o número exigido de equipamentos, mas também força a atribuição de valor zero para os equipamentos que estão em manutenção ( $s_{ts}=0$  ou  $s_{ms}=0$ ).

#### 4.2.4 Restrições

Finalmente, devem ser atribuídas às variáveis de balanço manipuladas nos balanços acima suas restrições, que representam os limites associados ao projeto dos equipamentos, regiões reais de operação e aspectos de confiabilidade. A representação das restrições na programação do GAMS é dada na forma de equações inequações, que limitam as variáveis conforme a Tabela 12.

TABELA 12: Restrições das variáveis envolvidas no modelo de otimização da rede termoelétrica

Variável	Função	Limite inferior	Limite Superior	Unidade
$(VS_o)_{6PV24}$	Válvula de Alívio de VS	0	170	t.h <sup>-1</sup>
$(VS_o)_{6PV25}$	Válvula de Alívio de VS	0	170	t.h <sup>-1</sup>
$(VS_o)_{1PV51}$	Válvula Redutora de Pressão	10	310	t.h <sup>-1</sup>
$(VS_o)_{6PV12}$	Válvula Redutora de Pressão	10	310	t.h <sup>-1</sup>
$(VS_o)_{4TBC1}$	Turbina de Compressor	115,5	136	t.h <sup>-1</sup>
$(VS_o)_{4TBC1}$	Turbina de Compressor	90	153	t.h <sup>-1</sup>
$(VS_o)_{4TBC1}$	Turbina de Gerador Elétrico	58	139	t.h <sup>-1</sup>
$(VS_o)_{7TBC2}$	Turbina de Gerador Elétrico	65,5	142	t.h <sup>-1</sup>
$(VS_o)_{22TBC1}$	Turbina de Compressor	201 / 150	285 / 337,5	t.h <sup>-1</sup>
$(VA_i)_{7TBC1}$	Turbina de Gerador Elétrico	9,5	121	t.h <sup>-1</sup>
$(VA_i)_{22TBC1}$	Turbina de Compressor	41 / 0	117 / 100	t.h <sup>-1</sup>
$(VA_i)_{7TBC2}$	Turbina de Gerador Elétrico	22,8	121	t.h <sup>-1</sup>
$(VA_p)_{1PV52}$	Válvula Redutora de Pressão	7	220	t.h <sup>-1</sup>
$(VA_p)_{6PV13}$	Válvula Redutora de Pressão	10	220	t.h <sup>-1</sup>
$(VM_j)_{4TBC1}$	Turbina de Compressor	59	86	t.h <sup>-1</sup>
$(VM_j)_{4TBC21}$	Turbina de Compressor	36,3	78	t.h <sup>-1</sup>
$(VM_j)_{22TBC1}$	Turbina de Compressor	147 / 150	167 / 269	t.h <sup>-1</sup>
$(VM_q)_{1PV13}$	Válvula Redutora de Pressão	6	110	t.h <sup>-1</sup>
$(VM_q)_{11PV4}$	Válvula Redutora de Pressão	6	87	t.h <sup>-1</sup>
$(VM_q)_{6PV14}$	Válvula Redutora de Pressão	5	60	t.h <sup>-1</sup>
$(VB_u)_{1PV14}$	Válvula de Alívio de VB	0	110	t.h <sup>-1</sup>
$(VB_u)_{6PV26}$	Válvula de Alívio de VB	0	170	t.h <sup>-1</sup>
$(VB_u)_{11PV1}$	Válvula de Alívio de VB	0	110	t.h <sup>-1</sup>
$(CV_e)_{4TBC1}$	Turbina de Compressor	45	63	t.h <sup>-1</sup>
$(CV_e)_{4TBC21}$	Turbina de Compressor	37	57,5	t.h <sup>-1</sup>
$(CV_e)_{7TG1}$	Turbina de Gerador Elétrico	11,5	62,5	t.h <sup>-1</sup>
$(CV_e)_{7TG2}$	Turbina de Gerador Elétrico	10,5	62,5	t.h <sup>-1</sup>
$(PO_{ps})_{4TG1}$	Gerador Elétrico	9	16	MW
$(PO_{ps})_{7TG2}$	Gerador Elétrico	9	16	MW
$(PO_{ps})_{77TG1}$	Gerador Elétrico	10	30	MW
$(PO_{ps})_{import}$	Rede Elétrica Externa	0	54	MW

Nos casos das turbinas, os limites foram baseados em informações dos fornecedores ou em limites práticos observados durante a operação das máquinas. No caso específico da 22TBC1, a tabela acima apresenta os limites das duas situações da máquina no formato [pré PGM-2005 / pós PGM-2005]. As válvulas redutoras possuem um limite mínimo de vazão superior a zero, conforme fornecedores, a partir do qual a

controlabilidade é assegurada. Adicionalmente, é importante mencionar que em algumas válvulas redutoras (especificamente as válvulas VS/VA) também é exigida uma vazão mínima de vapor para garantir sua confiabilidade: evitar a formação de condensado em pontos parados próximos da válvula e para mantê-la aquecida. Válvulas redutoras são projetadas para operação esporadicamente, mas quando são necessárias não podem falhar – portanto, a confiabilidade exige o atendimento da passagem de vazão mínima de vapor.

Toda formulação descrita acima, envolvendo a função objetivo e as restrições de igualdade e desigualdade apresenta o formato da equação (89), no Apêndice F. Assim, a modelagem apresenta-se como um problema de otimização com restrição, envolvendo variáveis binárias e onde as equações que representam a função objetivo e suas diversas restrições de igualdade e desigualdade são de natureza linear. Desta forma, a solução deve ser buscada via programação linear inteira mista (MILP), sendo uma programação convexa onde a função objetivo e as restrições formam um conjunto convexo e portanto o ótimo local também é o ótimo global.

#### 4.2.5 Implementação

A interface aplicada, GAMS IDE versão 2.0.27.7 Rev. 139, é um sistema de modelagem de alto nível para resolver problemas de programação matemática, baseado em uma linguagem capaz de lidar de forma compacta com modelos largos e complexos. Suas características são:

- Permite alterações no modelo já constituído de forma simples e segura;
- Apresenta método de declaração não ambíguo de relações algébricas;
- O ambiente permite que o modelo comece com um pequeno conjunto de dados e após verificada a precisão, expandir para um conteúdo mais largo;
- Apresenta rotina de verificação de falhas na formulação e erros na declaração do modelo algébrico;
- Interface com *solvers* (algoritmos aplicados para solução do problema modelado), com simplicidade na alteração do solver avaliado;
- Importação e exportação de dados com outros pacotes computacionais facilitada;

A construção do modelo pode ser realizada mesmo em arquivos tipo texto (".txt"), a partir de uma linguagem que envolve apenas a declaração de variáveis, equações e restrições de forma amigável. O GAMS (abreviação do inglês para "Sistema de Modelagem Algébrica Geral") dispõe internamente de uma série de algoritmos para solução de problemas MILP, mesmo na versão disponível gratuitamente na página da Internet [www.gams.com](http://www.gams.com). Esta versão livre possui um limite máximo de uso de 300 variáveis, 2000 elementos não zero e 50 variáveis discretas. Os modelos construídos neste trabalho apresentaram 114 variáveis, 375 elementos não zero e 50 variáveis discretas.

Para a seleção do algoritmo utilizado no trabalho, dentre os diversos disponíveis no GAMS para problemas MILP, foram realizadas comparações envolvendo seis situações, com cinco casos cada e com cálculos envolvendo cinco algoritmos, totalizando assim 150 avaliações. Os algoritmos utilizados na classificação foram COINSBB, OSL, CPLEX, XPRESS e BDMLP. Os resultados podem ser observados no apêndice D. É importante ressaltar que o caso 1 deste apêndice apresenta vazão mínima de vapor de  $10 \text{ t.h}^{-1}$  para cada válvula redutora, diferentemente do conceito de caso 1 apresentado no próximo capítulo. Também a situação do apêndice D4 envolve valores ligeiramente diferentes daqueles encontrados nos resultados apresentados no próximo capítulo, devido à diferença nas definições das necessidades de operação de bombas de combate a incêndio. Estas pequenas alterações ocorrem devido à evolução do desenvolvimento do trabalho após esta etapa de verificação dos algoritmos, mas de forma alguma deturpam o objetivo principal desta fase, que é a comparação em si, e esta foi feita nas mesmas bases para cada um das seis situações.

Observa-se que os algoritmos OSL, CPLEX, XPRESS e BDMLP apresentaram os mesmos resultados relativos às variáveis contínuas. O solver COINSBB apresentou alguns resultados diferentes dos demais, com custos maiores. É interessante observar que em versões mais recentes do GAMS este algoritmo foi substituído. Quanto às variáveis binárias relativas a ligamento ou desligamento de acionadores, em todos os casos a soma total do número de equipamentos similares ligados ou desligados foi a mesma, apesar de nem sempre ser atribuído zero ou um para o mesmo acionador, comparando os resultados

de solver para solver. Assim, por exemplo, na situação real de 07 de maio de 2005, no caso de passagens das válvulas redutoras conforme folha de dados, observa-se que todos os algoritmos acionam três bombas motorizadas 148MB01, de um total de cinco disponíveis, mas o solver OSL ativa a 148MB01 C enquanto o CPLEX aciona a 148MB01 F, sem, todavia influenciar no total de bombas similares selecionadas, apresentando no conjunto assim o mesmo número de equipamentos com o mesmo consumo energético.

Em relação ao tempo computacional, os algoritmos OSL, CPLEX e XPRESS apresentaram tempos de execução aceitáveis, conforme o comparativo no Apêndice E. Já o algoritmo BDMLP em alguns casos atingiu tempos de 5 segundos. Assim, entre os três solvers com tempos de execução aceitáveis, optou-se pelo algoritmo OSL, já utilizado em trabalhos anteriores (Hirata, 2003).

O algoritmo OSL para problemas MILP utiliza o método *branch and bound* que resolve uma série de problemas de programação linear aplicando algoritmo *simplex primal* – estes métodos são mais detalhadamente explicados no Apêndice F.

Para configuração do *solver* utilizado, foi necessário ajustar o critério de tolerância para otimalidades absoluta (*optca*) e relativa (*optcr*). Estas opções são utilizadas em problemas contendo variáveis discretas e fornecem critérios de parada, sendo reportada a solução encontrada para a qual o valor função objetivo encontra-se dentro dos critérios de “*optca*” e “ $100*optcr$ ” de melhor solução. Os valores atribuídos às opções *optca* e *optcr* foram respectivamente 0.0 e  $1e^{-6}$  (GAMS, a user's manual, 1998). Às demais opções do solver utilizado aplicaram-se valores *default*, e podem ser encontradas discriminadas no manual do *solver* OSL.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da criação do modelo de balanço e da formulação do sistema termoelétrico na plataforma GAMS, é possível estudar situações reais com o objetivo de verificar a condição de otimização do sistema termoelétrico. O procedimento adotado neste trabalho envolveu a verificação de 14 situações reais, sendo 11 ocorridos em 2005, mas antes da parada geral de manutenção, considerando assim a modelagem da 22TBC1 antiga. Os demais casos ocorrem em 2006, envolvendo a formulação para nova turbina de gás craqueado da planta de Processo 2. As situações foram selecionadas aleatoriamente, mas em períodos onde há estabilidade na carga das plantas durante pelo menos uma hora, com exceção aos casos onde há presença de alívios de vapor, que apresentam grande variabilidade na vazão aliviada. Mesmo assim, buscaram-se os períodos mais estáveis possíveis mesmo com a presença de alívios. Atualmente, tal período de estabilidade de uma hora é necessário, pois os SDCDs não estão sincronizados, havendo defasagem de até 15 minutos entre as informações resgatadas pelos sistemas. Assim, quanto maior o tempo de estabilidade, maior a garantia de que as informações resgatadas são representativas em termos de balanço da planta.

Os erros relativos e absolutos dos balanços de vapor dos coletores de VS, VA, VM e VB, definidos a partir da diferença entre as vazões totais de entrada e saída em cada coletor podem ser observados na Tabela 13.

TABELA 13: Verificação da precisão obtida na modelagem e balanço material da rede de vapor

Cenário	Data	Erros de Balanço	VS	VA	VM	VB
1	7/5/2005	Erro Absoluto (t/h)	5,6	-4,3	9,0	-29,0
		Erro Relativo (%)	0,5	-0,9	1,8	-9,7
2	29/5/2005	Erro Absoluto (t/h)	5,4	3,2	-4,6	-26,7
		Erro Relativo (%)	0,5	0,6	-0,9	-8,2
3	6/6/2005	Erro Absoluto (t/h)	-3,8	2,2	7,0	-28,4
		Erro Relativo (%)	-0,3	0,4	1,3	-8,4
4	27/6/2005	Erro Absoluto (t/h)	-39,3	21,0	9,3	-66,7
		Erro Relativo (%)	-3,4	4,1	1,8	-19,8
5	10/7/2005	Erro Absoluto (t/h)	-32,1	-6,2	2,9	11,9
		Erro Relativo (%)	-2,8	-1,2	0,5	3,3
6	14/8/2005	Erro Absoluto (t/h)	-17,2	-5,7	2,1	-10,3
		Erro Relativo (%)	-1,6	-1,2	0,4	-3,0
7	23/8/2005	Erro Absoluto (t/h)	-9,2	-11,6	19,7	-51,1
		Erro Relativo (%)	-0,8	-2,6	4,0	-18,3
8	17/9/2005	Erro Absoluto (t/h)	-0,4	7,6	-11,7	0,2
		Erro Relativo (%)	0,0	1,4	-2,2	0,0
9	19/9/2005	Erro Absoluto (t/h)	-6,5	5,0	-1,0	-24,4
		Erro Relativo (%)	-0,6	1,0	-0,2	-7,0
10	20/9/2005	Erro Absoluto (t/h)	-9,7	5,0	4,9	-18,2
		Erro Relativo (%)	-0,9	0,9	0,9	-5,1
11	3/10/2005	Erro Absoluto (t/h)	-7,5	-12,4	40,0	-31,4
		Erro Relativo (%)	-0,7	-2,6	7,2	-9,5
12	9/2/2006	Erro Absoluto (t/h)	-23,8	-12,6	18,9	-0,3
		Erro Relativo (%)	-2,1	-2,9	3,5	-0,1
13	21/2/2006	Erro Absoluto (t/h)	-7,5	7,7	-14,7	2,2
		Erro Relativo (%)	-0,6	1,5	-2,4	0,6
14	23/2/2006	Erro Absoluto (t/h)	4,2	24,1	-10,8	6,0
		Erro Relativo (%)	0,4	4,9	-1,8	1,6
Referência de erro máximo relativo (%)			3	5	7	10

Em geral, as situações reais apresentam erros relativos menores ou próximos à referência adotada, que são limites praticados na empresa, exceto nos casos de 27/06/05 e 23/08/05. Nestes casos, há presença de alívios de vapor. Como será visto, as imprecisões atribuídas ao modelo são maiores quando alívios de VB são envolvidos, repercutindo

principalmente no nível de VB. Isto ocorre porque o fechamento do balanço em VB é realizado igualando as entradas e saídas neste coletor, contabilizando também as vazões de alívio. No presente trabalho, as vazões de alívios foram baseadas em relações teóricas com abertura de válvula que não representam adequadamente a condição prática, provocando imprecisões ao balanço. Além disto, a natureza da ocorrência de alívios indica um transiente, o que por sua vez também impõe imprecisões a uma metodologia baseada em regime permanente. Comentários adicionais a respeito da presença de alívios serão feitos adiante, quando os casos avaliados serão analisados.

Para cada uma das 14 situações foram estudados cinco casos diferentes. Basicamente os casos diferem entre si pela escolha de vazão mínima requerida pelas válvulas redutoras de pressão e por alterações nos limites de trabalho dos geradores internos de energia elétrica, sendo que as alterações referentes à turbina a gás obrigatoriamente devem ser acompanhadas por modificações de projeto. Nos casos das válvulas redutoras, o objetivo é explorar a influência das vazões mínimas e suas conseqüências na distribuição de vapor e no custo. Para os casos que envolvem modificações de projeto, pretende-se verificar através dos possíveis ganhos adicionais a conveniência de executar um estudo de viabilidade técnico-econômica para execução destas modificações.

- Caso 1: representa uma condição possível de se obter com as válvulas atuais, onde a passagem mínima exigida pelas válvulas redutoras VS/VA é de  $15 \text{ t.h}^{-1}$  para válvula 6PV12 e de  $10 \text{ t.h}^{-1}$  para 1PV51 e onde as válvulas redutoras VA/VM e VM/VB tem vazão mínima de zero. A exigência destas vazões mínimas para as 6PV12 e 1PV51, como já foi mencionado, está relacionada à garantia de confiabilidade, evitando condensações e mantendo a válvula aquecida;
- Caso 2: a modelagem foi conduzida considerando  $5 \text{ t.h}^{-1}$  de vazão mínima exigida por cada válvula redutora de pressão. Em relação às válvulas redutoras VS/VA, há um relaxamento do limite apontado no caso anterior (mas que deve ainda ser aprovado sob ótica da confiabilidade, já que se situa abaixo da média dos valores recomendados e pode haver dificuldades na sua implementação nas válvulas de maior vazão, devido à imprecisão do controle nesta faixa de vazão nestas válvulas). Por outro lado, a

consideração do caso anterior de vazão mínima igual a zero para as redutoras VA/VM e VM/VB, apesar de ser positiva do ponto de vista do consumo energético, pode causar oscilações indesejáveis na rede de vapor devido à existência de um limite de vazão abaixo do qual não é garantida a controlabilidade adequada da válvula. A imposição de uma vazão mínima de  $5 \text{ t.h}^{-1}$  nestas válvulas visa assim aproximar-se da região de confiabilidade, ainda que um pouco abaixo do recomendado na folha de dados destes equipamentos. Assim, a idéia geral deste caso é garantir certos aspectos de confiabilidade e controlabilidade, mas considerando algum avanço em relação aos valores atualmente existentes. Assim, sua implementação efetiva dependeria de prováveis ajustes;

- Caso 3: os modelos de otimização foram estudados considerando como vazão mínima exigida pelas válvulas redutoras os valores apresentados na tabela 12, que correspondem às informações disponíveis nas folhas de dados dos equipamentos e representam as condições de fluxo mínimo para garantir controlabilidade adequada. Sua implementação pode não ser direta nas válvulas redutoras VS/VA, onde a exigência mínima de vapor por confiabilidade tem sido maior do que seus valores apresentados na tabela 12;
- Caso 4: A modelagem foi conduzida considerando que a turbina a gás é capaz de operar em potência máxima de projeto do gerador, o que significa atingir 38 MW de geração elétrica. Foram consideradas vazões mínimas de  $10 \text{ t}^{-1}.\text{h}$  em cada válvula redutora de pressão;
- Caso 5: Além de considerar a turbina a gás em condições de operar em condição de máxima potência no gerador (38 MW) também reduziu-se a geração mínima dos turbogeradores a vapor para 8 MW. Foram consideradas vazões mínimas de  $5 \text{ t}^{-1}.\text{h}$  em cada válvula redutora de pressão;

Os casos 1, 2 e 3 assim permitem verificar a influência de possíveis ganhos da vazão consumida nas válvulas redutoras essencialmente para garantir confiabilidade e/ou controlabilidade da mesma. Caso conclua-se que algum ajuste pode ser necessário nas válvulas, isto é possível de ser realizado em operação normal ou com algum investimento apenas nas válvulas redutoras. Nos casos 4 e 5, onde se contempla a operação em até 38 MW com a turbina a gás, isto deve ser realizado com alterações de projeto no

economizador para aumentar a recuperação de energia dos gases de combustão e nos fornos de Processo 2, visando absorver na água de alimentação este incremento de energia residual.

Finalmente, o caso 5, além de alterações na turbina a gás para permitir operação em até 38 MW, envolve a operação dos turbogeradores com um mínimo de geração elétrica de 8 MW, que seria um limite em discussão para garantir confiabilidade mínima no suprimento de energia por estas máquinas, e menor do que o valor atual de 9 MW.

Os custos introduzidos no modelo foram considerados como iguais à média dos preços praticados no mês de ocorrência de cada situação. O custo específico (\$/t) de produção de vapor de superalta pressão basicamente considera o custo de combustíveis e custo de água de alimentação de caldeira, e outros custos variáveis menores (como ar de instrumento, água de resfriamento, etc.). Os custos específicos de VA, VM e VB são calculados com o custo do vapor a partir do qual é gerado, considerando as diferenças de entalpias. A tabela 14 apresenta os custos (em moeda fictícia) com o objetivo de apresentar as variações entre os meses onde houveram situações avaliadas no presente trabalho. O fator F empregado visa evitar a apresentação de cifras estratégicas da empresa, mas mantendo as oscilações de custo ocorridas durante os períodos.

Foram considerados basicamente os custos variáveis, pois estão relacionados aos insumos marginais que sofrem variação devido às alterações computadas. Não foram considerados custos fixos uma vez que a companhia já deve arcar com despesas de pessoal e manutenção, independentemente do nível de produção de cada equipamento. O custo de capital também não importa no contexto, uma vez que os ativos da central termoelétrica já estão amortizados. No caso dos turbogeradores a vapor, o custo discriminado na tabela exclui o custo do vapor, uma vez que este já é considerado em parcela específica na função objetivo – caso contrário, haveria penalização indevida para os turbogeradores a vapor. Os custos das diversas classes de vapor são oriundos dos valores praticados internamente na empresa, e tendo origem principalmente no custo de combustíveis. Para as variações na geração de vapor, foi considerado como combustível marginal a matriz de combustíveis aplicada, formada por combustíveis comprados como carvão e gás natural, e combustíveis gerados internamente, como óleo e gás residual de

processo. O custo do vapor se mantém durante as otimizações, pois se considera que o combustível marginal que será variado para atender a nova demanda apresenta a mesma participação da matriz original. Esta variação garante inclusive a manutenção dos atendimentos a emissões de SO<sub>x</sub>.

É importante mencionar também que as eventuais reduções de vapor produzido nas caldeiras (nos fornos de pirólise, como já se afirmou, não é possível manipular a geração de vapor) na prática podem ser realizadas de forma proporcional nos geradores de vapor de utilidades que estão operando.

TABELA 14: Custos médios mensais utilizados nas avaliações dos resultados ótimos para as 14 situações estudadas

Custos	maio-05	junho-05	julho-05	agosto-05	setembro-05	outubro-05	fevereiro-06
Produção de VS (R\$*F/t)	2.20	2.18	2.81	2.85	2.95	2.85	2.97
Produção de VA (R\$*F/t)	1.90	1.88	2.42	2.46	2.54	2.45	2.56
Produção de VM (R\$*F/t)	1.71	1.70	2.18	2.22	2.30	2.22	2.31
Produção de VB (R\$*F/t)	1.28	1.27	1.64	1.66	1.72	1.66	1.74
Energia Elétrica Importada (R\$*F/MWh)	9.20	4.44	3.50	13.00	17.75	5.51	3.03
Energia Elétrica - turbogeradores a vapor (R\$*F/MWh)	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Energia Elétrica - turbina a gás (R\$*F/MWh)	4.52	4.46	-	5.03	4.41	4.62	4.15
Tarifa da Demanda Contratada no Horário de Ponta (R\$*F/MW <sup>+</sup> )	236.60	236.60	340.20	340.20	340.20	340.20	340.20

**Nota 1:** A unidade monetária (R\$) está multiplicada por um dado fator F, mas a variação relativa ao longo dos meses é preservada

**Nota 2:** (+) No caso de consumo na ponta, o custo refere-se ao valor da tarifa vezes o montante contratado na ponta (25 MW), independente da quantidade consumida. No caso do consumo ultrapassar em mais de 5% este valor durante o horário de ponta, a multa será 3 vezes o valor da tarifa mencionada na tabela.

Os resultados totais para cada situação e casos estudados encontram-se nos apêndices C e E. No Apêndice B encontram-se os PFDs do sistema de vapor

apresentando para cada situação a distribuição de vapor real observada e os resultados obtidos considerando caso 3. Já no apêndice G há uma discussão individual e detalhada de cada caso, comparando cada resultado otimizado à situação original verificada em cada período estudado. A seguir, os resultados serão apresentados de forma a, visualmente, permitir uma comparação direta das situações e casos estudados, para cada aspecto de interesse relevante a este trabalho. Para maiores detalhes sobre os diversos resultados e discussões de algum caso específico, recomenda-se a leitura do apêndice G.

## 5.1 CUSTO OPERACIONAL

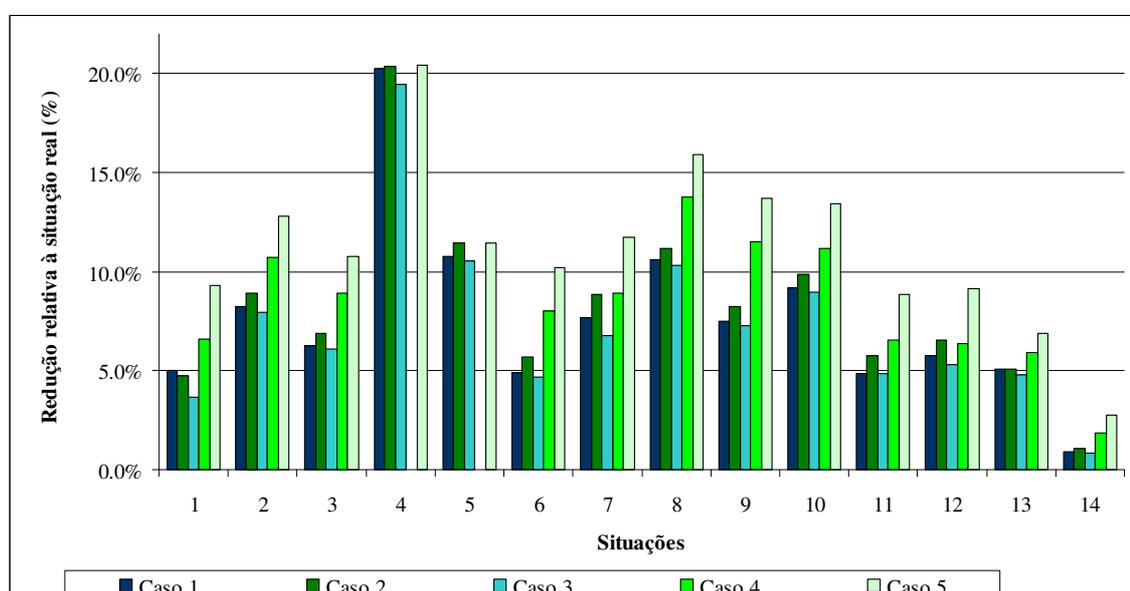


Figura 12: Redução de custo operacional da central termoelétrica.

A Figura 12 apresenta as reduções de custo operacional CO (definido na equação 33) dos diversos resultados otimizados em relação a cada custo das respectivas situações reais. Em todas as situações houve redução de custo, com variações. É possível observar resultados maiores quando o limite de produção máxima de energia elétrica na turbina a gás e o limite de produção mínima de energia elétrica nos turbogeradores a vapor são flexibilizados. O caso 4, no entanto apresenta resultados destoantes das demais situações, fato este atribuído à presença de alívios de vapor, que devido a sua natureza instável e a imprecisões na maneira de estimar a

vazão a partir da abertura de válvulas, levaram a erros de balanço que por sua vez contabilizam um consumo menor de VB. Estes menores consumos calculados de VB (que são incorretos) levam, enfim a menores necessidades de geração de vapor. O caso 14, por sua vez, apresenta os menores resultados, associados à ausência de um dos turbogeradores a vapor e ao baixo custo da energia elétrica comprada, em fevereiro.

## 5.2 PRODUÇÃO DE VAPOR NAS CALDEIRAS DE UTILIDADES

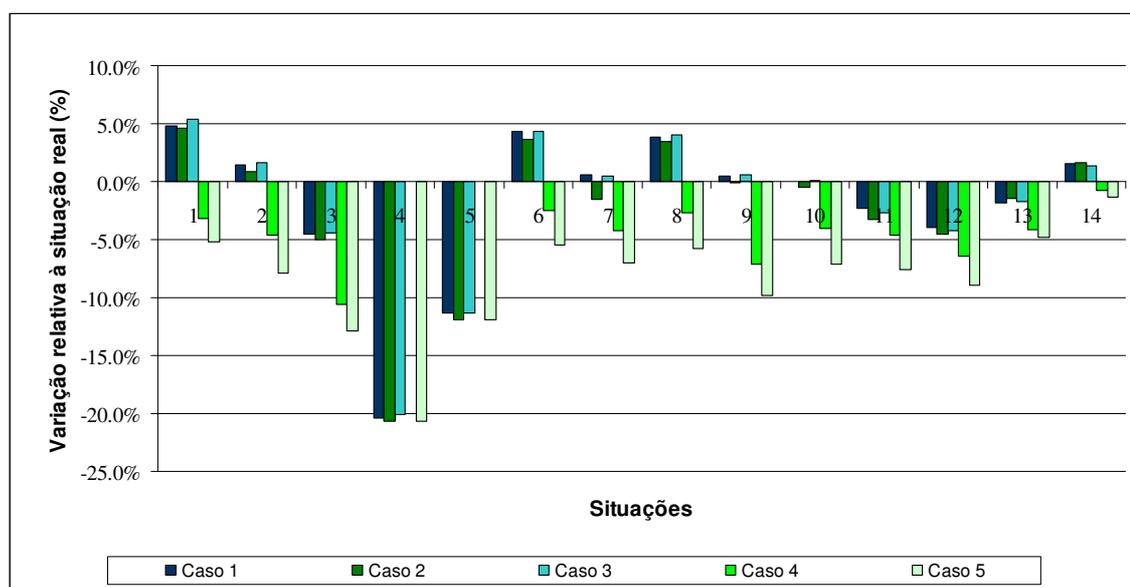


Figura 13: Variação da produção de vapor nas diversas situações em relação ao caso real.

É possível verificar, na Figura 13, que nos casos de 1 a 3 (excluindo os períodos que envolvem a presença de alívios), a maioria das situações (67%) apresenta redução na geração de vapor nas caldeiras. Na média destas doze situações, há uma redução de  $3.9 \text{ t.h}^{-1}$  para o caso 1, de  $5,2 \text{ t.h}^{-1}$  para o caso 2 e de  $3,4 \text{ t.h}^{-1}$  para o caso 3. Considerando os casos 4 e 5, e excluindo também os períodos com alívio de vapor, todas as situações apresenta redução na geração de vapor nas caldeiras, com valores expressivos médios de respectivamente  $15,0$  e  $22,3 \text{ t.h}^{-1}$  de redução na geração de vapor para os casos 4 e 5.

Observa-se que nas situações 2, 6, e 8 o aumento da produção nas caldeiras está fortemente associado ao fato de que nos meses em que estas situações ocorreram (maio,

julho e agosto) correspondem aos períodos onde a energia elétrica importada apresentou os preços mais altos (o mesmo pode ser atribuído aos aumentos observados nas situações 2, 7, 9 e 10, apesar da proximidade em relação ao valor de produção das respectivas situações reais). Já a situação 14 ocorre em um período de baixo custo da energia elétrica comprada, mas mesmo assim observa-se um aumento na produção de vapor, da ordem de 1.5% da produção real, que pode ser explicada pela precisão dos valores.

Estas reduções médias tanto para os casos de ajustes considerados simples quanto em modificações de projeto mais profundas ocasionariam diretamente reduções proporcionais no consumo de combustíveis e assim na emissão de dióxido de carbono.

### 5.3 DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA

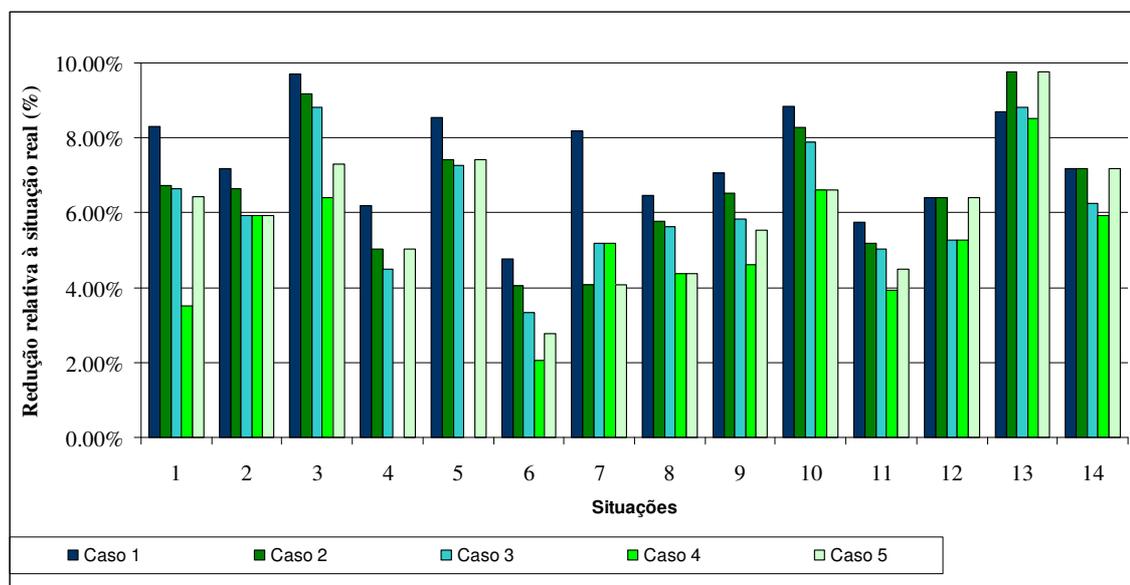


Figura 14: Redução da demanda de energia elétrica da empresa em relação ao caso real.

Conforme observado na figura 14, em todas as situações avaliadas foram obtidas reduções nas necessidades de energia elétricas para os casos otimizados da rede termelétrica. Isto se deve à substituição de acionadores elétricos por turbinas a vapor, motivada pelo alto custo da energia elétrica em alguns períodos ou pelo uso racional de energia, minimizando aberturas nas válvulas redutoras de pressão. Os casos 4 e 5 em

geral apresentaram reduções menores do que nos demais casos, já que a possibilidade de produzir energia elétrica na turbina a gás a custos torna mais tolerável uma demanda maior de potência elétrica, mesmo assim viabilizando custos menores da central termoeletrica como visto no item 5.1.

Com uma análise rápida do que é relevante, verificamos a situação 3 influenciada pelo custo de energia e tarifa do horário de ponta, as situações 5, 13 e 14 impactadas pela ausência de geradores elétricos internos. A situação 4 também é impactado pela ausência da turbina a gás (em manutenção), mas os resultados ficam prejudicados pelo fato de haver alívios de VB, conforme já explicado anteriormente.

## 5.4 ENERGIA ELÉTRICA NA TURBINA A GÁS

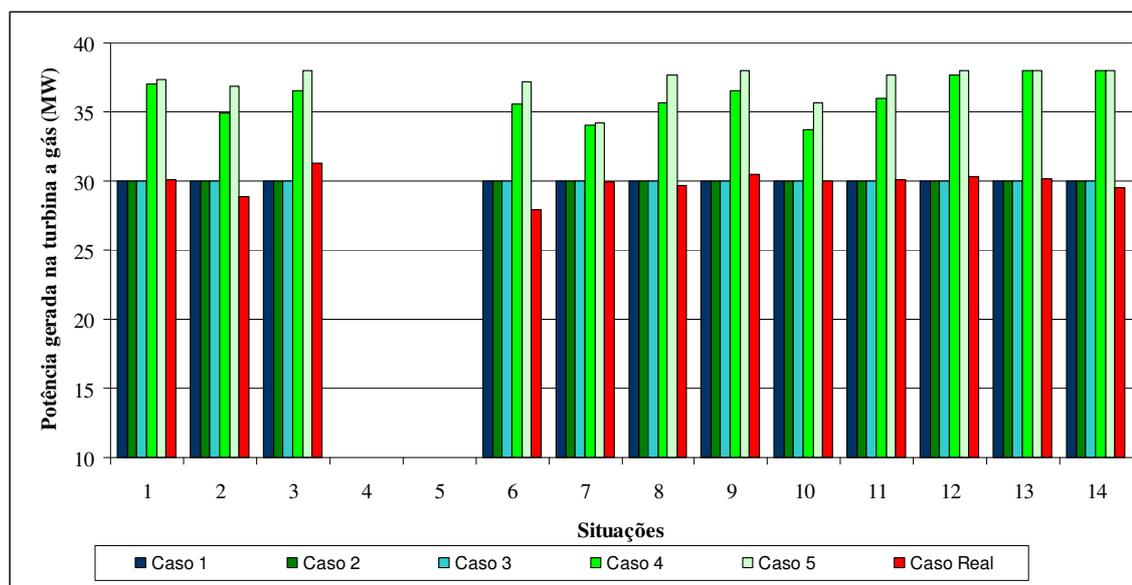


Figura 15: Produção de energia elétrica na turbina a gás.

Na figura 15, em todas as situações, para os primeiros 3 casos de otimização, a potência da turbina a gás sempre foi maximizada, tendo em vista seu preço em relação às demais fontes de energia elétrica. Da mesma forma, quando o limite superior de geração elétrica desta máquina é flexibilizado, há uma tendência de gerar-se mais potência elétrica, como observado nos casos 4 e 5. No caso de haver redução da geração elétrica

da turbina a gás também reduz-se a temperatura da água de alimentação dos fornos da Unidade de Processo 2, levando a uma menor produção de vapor nestes fornos o que por sua vez causa uma aumento da necessidade de produção de vapor nas caldeiras de Utilidades, elevando o custo da central termelétrica, e este processo também desencoraja a redução de produção elétrica no 77TBC1.

As situações de 27/06/05 e 10/07/05 não apresentam resultados, uma vez que envolvem parada da turbina a gás para manutenção.

## 5.5 VÁLVULAS REDUTORAS DE VAPOR VS/VA

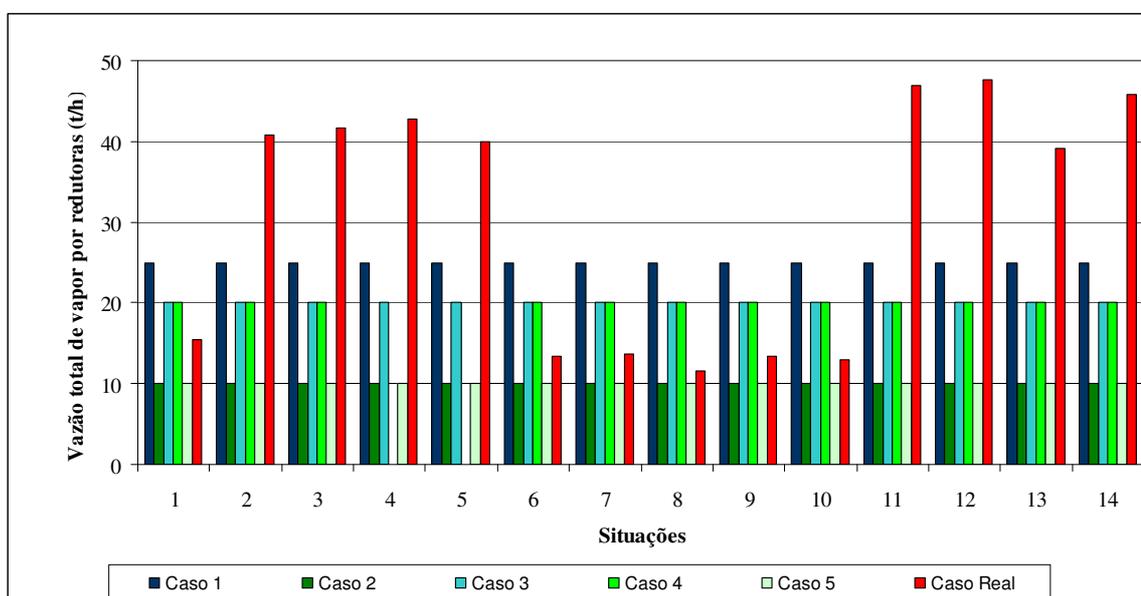


Figura 16: Vazão de vapor através das válvulas redutoras VS/VA.

Nota-se na figura 16 que em todas as situações, as otimizações levaram os 5 casos avaliados aos seus limites estabelecidos de vazão mínima de vapor pelas duas válvulas redutoras de vapor VS/VA. Em algumas situações, a condição real apresentou vazões de vapor menores do que os resultados otimizados, mas isto é explicado pelo fato de que estavam ocorrendo vazões menores do que o mínimo estabelecido. Neste trabalho, no entanto, a opção feita foi rigorosamente atender aos limites mínimos, preservando assim a confiabilidade adequada às operações.

Na maioria dos casos e situações, houveram aumentos nas extrações de VA e/ou VM em turbinas de dois estágios, substituindo assim a atuação das redutoras VS/VA. O potencial de redução vapor por estas válvulas é evidente e hoje está relacionado a problemas nas próprias válvulas. A partir de manutenção adequada nas mesmas, será possível reduzir a passagem a valores menores dos que ocorrem atualmente.

## 5.6 VÁLVULAS REDUTORAS DE VAPOR VA/VM

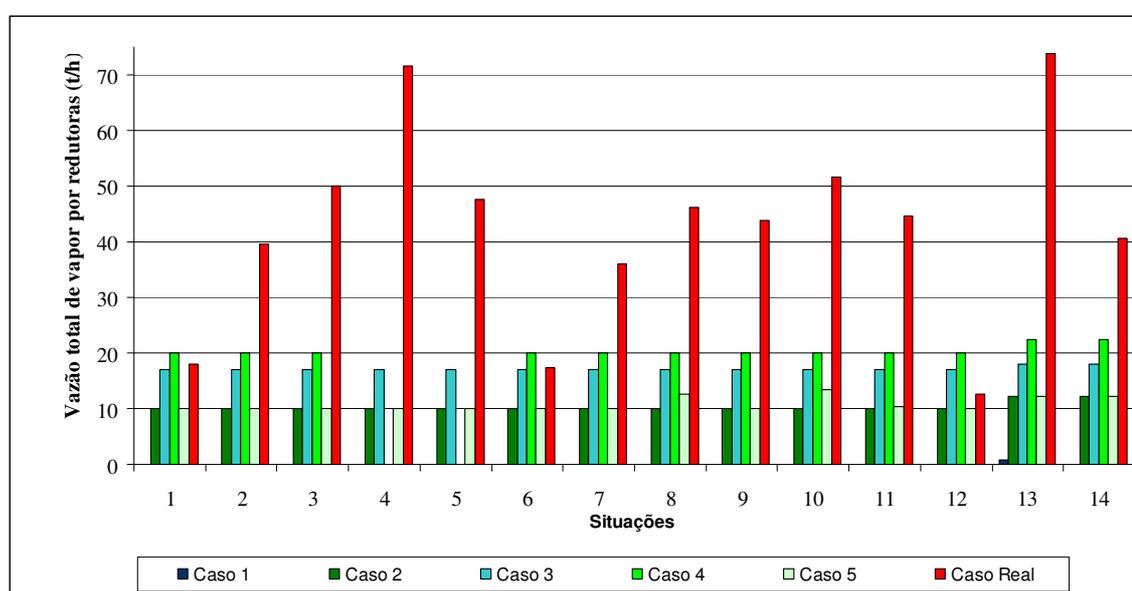


Figura 17: Vazão de vapor através das válvulas redutoras VA/VM.

Da mesma forma, o potencial de fechamento de válvulas redutoras de vapor VA/VM pode ser mais bem explorado. Nas otimizações “caso 1”, em praticamente todas as situações estudadas foi possível fechar completamente estas válvulas, eliminando esta geração de entropia do sistema.

É visível na figura 17 a grande incidência de aberturas nas situações reais, sendo estas válvulas as que menos se justificam apresentar aberturas tendo em vista a grande quantidade de turbinas que consomem VA e geram VM ou VB e que são largamente utilizadas nos casos de otimização deste trabalho. A aplicação destas turbinas também

está associada à redução das necessidades de energia elétrica, tendo em vista que o número de equipamentos acionados (como bombas, ventiladores e compressores) é constante para cada situação estudada.

## 5.7 VÁLVULAS REDUTORAS DE VAPOR VM/VB

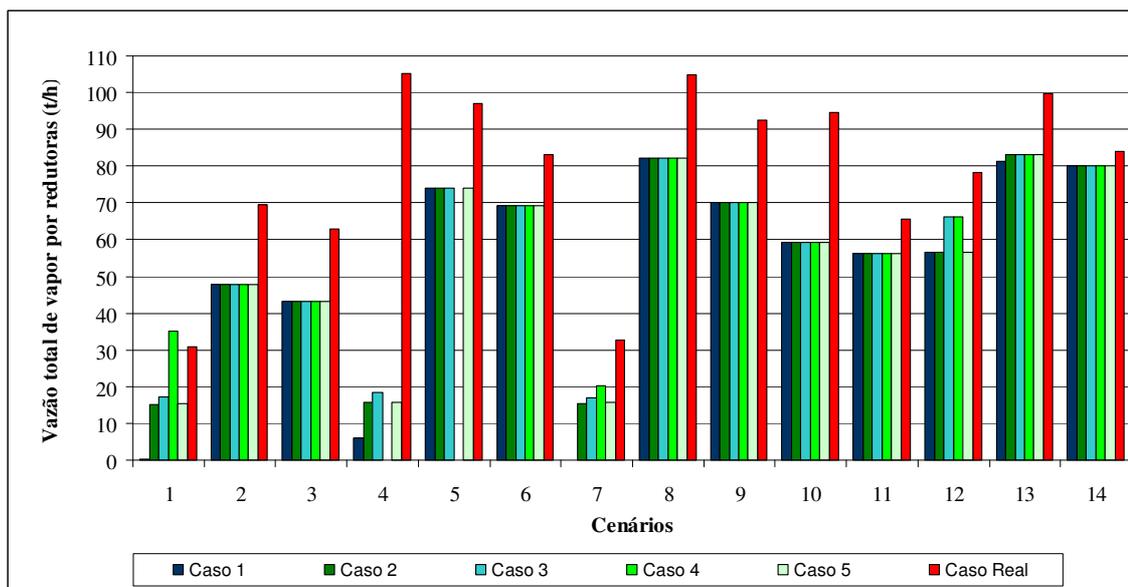


Figura 18: Vazão de vapor através das válvulas redutoras VM/VB.

Nas válvulas redutoras VM/VB não foi possível atingir os valores mínimos estabelecidos como restrições para a passagem de vapor, conforme figura 18. Isto ocorre porque geralmente há uma grande demanda de valor de baixa pressão, e ao mesmo tempo não havendo turbinas VM/VB em número suficiente para substituir completamente a atuação destas válvulas. Mesmo assim, alguma redução em vazão pelas redutoras é obtida, melhorando a condição em relação à situação real.

Os resultados aparentemente bons para as situações 4 e 7 não são confiáveis devido à presença de alívios de vapor no caso real, e na situação 14 a pouca diferença existente entre os resultados de otimização e o caso real confirmam que a condição real apresenta-se bem próxima da configuração otimizada.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

Observando os casos avaliados no capítulo anterior, é possível chegar-se às seguintes conclusões:

- Há potencial razoável de otimização de custo da central termoeétrica. Em praticamente todos os períodos avaliados, incluindo situações diversas, como horário de ponta e ausência de fontes internas de geração de energia, ocorre minimização de custo, tanto nos casos baseados apenas em ajustes operacionais em equipamentos e válvulas redutoras quanto naqueles em que alguma alteração de projeto se faz presente;
- Nos casos em que apenas ajustes operacionais se fazem necessários, os potenciais de economia variam da ordem de 3% (para os casos que operam em condições bem próximas da situação ótima) até 14% do custo da central termoeétrica, indicando um potencial de ganho imediato, praticamente sem investimentos;
- A minimização do custo da central termoeétrica não é necessariamente equivalente à minimização da produção de vapor (ou seja, geração mínima de vapor), isto é evidenciado pela variação do custo da energia, considerado na Tabela 14, dentro do período avaliado. Nos meses de maio, agosto e setembro a geração de vapor nas caldeiras nos resultados otimizados (casos 1 a 3) foi maior ou praticamente a mesma do que o caso real, basicamente devido ao maior custo da energia elétrica importada, viabilizando o maior uso de turbinas e maior geração interna de energia pelos turbogeradores a vapor. Há assim, minimização dos custos, mesmo havendo, em alguns casos, maior consumo de combustível nas caldeiras (ou seja, há aumento da geração de vapor em relação ao caso base) ou maior vazão de condensação nas turbinas de extração-condensação.

- Em todas as situações otimizadas há redução do consumo de energia elétrica pela substituição de acionamento do tipo motores elétricos por turbinas a vapor. Este potencial é particularmente interessante, uma vez que o universo de equipamentos modelados para seleção de acionadores pertence essencialmente à unidade de utilidades. Com uma eventual futura inclusão de acionadores das plantas de Processo 1 e 2, seria possível ampliar este potencial de ganhos.
- O balanço de vapor apresentou precisão adequada, com erros entre as entradas e saídas dos coletores de vapor menores do que a referência utilizada na Tabela 13, exceto nos casos onde há alívios de vapor.
- A aplicação do modelo não é recomendada a situações onde ocorrem alívios de vapor de baixa pressão enquanto suas vazões não forem determinadas adequadamente. Se mesmo assim a aplicação for necessária, antes de aplicar-se a rotina de otimização, as válvulas de controle de alívio devem ser fechadas por ajustes no sistema baseados em heurísticas operacionais. Após, com a ausência de alívios e estabilização do sistema termoeletrico, é possível avaliar os potenciais de economia pelo uso do modelo de otimização.
- Na maioria das situações o modelo de otimização não consegue reduzir a vazão nestas válvulas redutoras até seu valor mínimo devido à demanda total de vapor de baixa pressão ser superior à disponibilidade de equipamentos geradores de VB, necessitando assim atuação das válvulas rebaixadoras de pressão. Assim, para futuros projetos que envolvem a inclusão de novas turbinas de simples estágio é recomendável que a alimentação seja feita em VM e a extração em VB, o que permitiria uma maior redução na abertura das válvulas redutoras VM/VB.
- A redução de carga elétrica da turbina a gás não é atrativa, especialmente pela necessidade de aumento da produção de vapor nas caldeiras de utilidades já que a produção nos fornos de Processo 2 reduz-se pelo fato de receber água de alimentação a uma temperatura menor do que 300 °C. Em nenhum caso de operação da turbina a gás sua carga foi reduzida de 30 MW.
- A turbina da bomba de água de combate a incêndio, um dos recursos mais aplicados hoje para ajuste do balanço de vapor, não é adequado, conforme o otimizador,

para a maioria dos casos estudados. Isto está coerente com o fato de que há uma grande demanda de VB, e há necessidade de abertura de redutoras VM/VB, gerando assim uma demanda de VM, que só será aumentada no caso de utilizar tal turbina, na qual a exaustão é atmosférica, a qual também fere os princípios da cogeração.

- O *solver* CoinSBB não é recomendado para otimização do sistema termoelétrico modelado, já que alguns resultados com custos maiores do que o valor mínimo, obtido com outros *solvers* avaliados;
- O *Solver* BDMLP não é recomendado para otimização do sistema termoelétrico modelado devido ao seu alto tempo computacional.

Finalmente, é preciso lembrar o fato de que estes resultados foram obtidos com foco na seleção de motores ou turbinas na unidade de utilidades, que tem para si a centralização da gestão do sistema termelétrico. Isto facilita a agilidade e tomada de decisões em relação às ações recomendadas pelo otimizador, mas de certa forma limita o potencial de ganhos, que seria aumentado com a inclusão de equipamentos das unidades de Processo 1 e 2.

## 6.1 FUTURO

Como próximos passos, são propostos os seguintes assuntos para a continuidade deste trabalho:

- Realização de um estudo de viabilidade técnico-econômica, verificando qual a taxa de retorno de modificações na turbina a gás e fornos de unidades de Processo 1 e 2 em relação aos ganhos ilustrados nas 14 situações avaliadas deste estudo. Será necessário também ajuste no custo de gás natural para a turbina a gás, para faixa acima de 30MW de carga do equipamento.
- Adaptação da planilha de balanço de vapor nos sistemas corporativos de informação, de forma a permitir uma visualização detalhada das diversas entradas e saídas de vapor;

- Geração de um pacote de otimização mais automatizado, envolvendo a saída de informações já em um formato sumarizado, como uma “receita” para ajuste. Propor também a inserção de informações de status das turbinas e motores que hoje não constam nos SDCDs, de forma a agilizar a coleta de dados sobre os sistema de vapor;
- Incluir módulo de otimização que permita a seleção da melhor matriz de combustíveis, de acordo com a disponibilidade e custos dos insumos energéticos gerados internamente ou comprados e também de acordo com as restrições ambientais.
- Adaptação do pacote de otimização para permitir também a avaliação do custo variável dos vapores de alta, média e baixa pressão, para usos internos, como avaliação de custos operacionais das unidades produtivas;
- Modelar mais adequadamente as válvulas de controle de alívio de vapor, minimizando os erros encontrados neste trabalho, permitindo a aplicação do otimizador em períodos de ocorrências de alívios.

## CAPÍTULO 7

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A GUIDE TO COGENERATION. *The European Association for the Promotion of Cogeneration*. Brussels: EDUCOGEN, 1999. Disponível em < [http://www.cogen.org/Downloadables/Projects/EDUCOGEN\\_Cogen\\_Guide.pdf](http://www.cogen.org/Downloadables/Projects/EDUCOGEN_Cogen_Guide.pdf) >. Acesso em: janeiro de 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. *Conservação de Energia – Uso Racional de Energia*. Disponível em < [http://www.anp.gov.br/energias/uso\\_racional.asp](http://www.anp.gov.br/energias/uso_racional.asp) >. Acesso em: janeiro de 2006.

AMERICAN COUNCIL FOR AN ENERGY-EFFICIENT ECONOMY (ACEEE). *Combined Heat and Power: The Efficient Path for New Power Generation (ACEEE Fact Sheets)*. Washington. Disponível em < <http://www.aceee.org/energy/chp.htm> >. Acesso em: janeiro de 2006.

BIEGLER, L. T. e GROSSMANN, I. E. *Retrospective on optimization*. Computers & Chemical Engineering, n. 28, p. 1169-1192, 2004.

BOJIĆ, M. E STOJANOVIĆ, B. *MILP Optimization of a CHP Energy System*. Energy Conversion and Management, v. 39, n. 7, p. 637-642, 1998.

BROOKE, A., KENDRICK, D., MEERAUS, A. E RAMAN, R. *GAMS – A user's guide*. GAMS Development Corporation, 1998.

CHERKASSKY, V. M., *Pumps, Fans and Compressors*. Moscow, 1980.

COMMONWEALTH OF VIRGINIA. *Cogeneration of Steam and Electric Power: Pollution Prevention Opportunities and Options*. USA: Department of Environmental Quality (Office of Pollution Prevention), 1994. Disponível em: <<http://www.p2pays.org/ref/15/14372.pdf> >. Acesso em: 23 de maio de 2006.

DIAS, R. A., MATTOS, C. R. e BALESTIERI, J. A. *Conservação de energia: Conceitos e Sociedade*. Núcleo de Estudos e Pesquisas em Educação Tecnológica / Centro Tecnológico – Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em : <[http://srv.emc.ufsc.br/~nepet/Artigos/Texto/Cons\\_en.htm](http://srv.emc.ufsc.br/~nepet/Artigos/Texto/Cons_en.htm) >. Acesso em: janeiro de 2006.

EASTWOOD, A., BEALING C. *Optimizing the Day to Day Operation of Utility Systems*. Northwich: KBC / Linnhoff March, 2003.

EDGAR, T. F. e HIMMELBLAU, D. M., *Optimization of Chemical Processes*. 1<sup>a</sup> ed., USA: McGraw-Hill, 1988.

FILHO, H. P. *PIB e Consumo de Energia – Uma Nova Relação*. COMCIÊNCIA – Revista Eletrônica de Jornalismo Científico. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/2004/12/03.shtml>>. Acesso em: janeiro de 2006.

HIRATA, K., SAKAMOTO, H., O'YOUNG, L., CHEUNG, K. Y., HUI, C. W. *Multi-site integration – an industrial case study*. Computers & Chemical Engineering, v. 28, p. 139-148, 2004.

IBM (2004). OSL (Optimization Subroutine Library) Solver Manual.

MAVROMATIS, S. P., KOKOSSIS, A. C. *A logic model for the analysis and optimization of steam turbine network*. Computers in Industry, v. 36, p. 165-179, 1998.

MCCARL, B. A. *GAMS User Guide*. GAMS Development Corporation, 2004.

MILOSEVIC, Z. E PONHÖFER, C. *Refiner improves steam system with custom simulation / optimization package*. Oil & Gas Journal, august, p. 90-94, 1997.

MORAN, M. J. e SHAPIRO, HOWARD N. *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*. 4<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.

MUDANÇA DO CLIMA. VOLUME I – NEGOCIAÇÕES INTERNACIONAIS, VULNERABILIDADE, IMPACTOS E ADAPTAÇÃO À MUDANÇA DO CLIMA. Cadernos NAE – Processos Estratégicos de Longo Prazo, n. 3. Brasília: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, 2005.

ONSITE SYCOM ENERGY CORPORATION. *Review of Combined Heat and Power Technologies*. USA: Department of Energy – Office of energy and renewable energy, 1999. Disponível em < [http://www.eere.energy.gov/de/pdfs/chp\\_review.pdf](http://www.eere.energy.gov/de/pdfs/chp_review.pdf)>. Acesso em: janeiro de 2006.

PAPALEXANDRI, K. P., PISTIKOPOULOS, E. N., KALITVENTZEFF B., DUMONT, M. N., URMANN, K. e GORSCHLUTER, J. *Operation of a Steam Production Network with variable demands Modelling and Optimization under Uncertainty*. Computers & Chemical Engineering, v. 20, supl., p. s763-s768, 1996.

PEREIRA, C. A. A. *Curso de Equacionamento de Sistemas Termoelétricos*. Apostila obtida em curso sobre Geração e Distribuição de Vapor. Rio de Janeiro, 1995.

PINTO, J. H. F. *Otimização On-line do Sistema Termoelétrico de uma Companhia Petroquímica*. Figener S/A Engenheiros Associados. Disponível em <[http://www.figener.com.br/informativos/informativo\\_03.pdf](http://www.figener.com.br/informativos/informativo_03.pdf)>. Acesso em: abril de 2004.

PIRES, V. F. M., ZEMP, R. J. *Análise Energética Global de um Complexo Petroquímico*. Artigo publicado no XV COBEQ / II CBTERMO, 2004.

REIS, L. B., CORREIA, J. S. S e MENDONÇA, R. C. *Energy Industry in Brazil: a critical vision*. International Journal of Regulation and Governance, v. 1, p. 47-68, 2001.

SECCHI, A. R. *Otimização de Processos*. Apostila apresentada em curso de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

STRAPASSON, A. B. *A Energia Térmica e o Paradoxo da Eficiência Energética – Desafios para um novo Modelo de Planejamento Energético*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

STROUVALIS, A. M., MAVROMATIS, S. P. E KOKOSSIS, A. C. *Conceptual Optimization of Utility Networks Using Hardware and Comprehensive Hardware Composites*. Computers & Chemical Engineering, v. 22, p. 175-182, 1998.

THE TECHNOLOGY ROADMAP FOR THE PETROLEUM INDUSTRY. *API Technology Committee*. Chicago: Workshop, 1999. Disponível em: <[http://www.eere.energy.gov/industry/petroleum\\_refining/pdfs/petroleumroadmap.pdf](http://www.eere.energy.gov/industry/petroleum_refining/pdfs/petroleumroadmap.pdf)>. Acesso em: 23 de maio de 2006.

VAN WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E. E BORGNAKKE, CLAUS. *Fundamentos da Termodinâmica*. 6a ed., São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2003.

VERÍSSIMO, M. E. Z. *Algumas Considerações sobre o Aquecimento Global e suas Repercussões*. Publicação Terra Livre, ano 19, v. 1, n. 20. São Paulo: Associação dos Geógrafos Brasileiros, 2003.

WESTON, K. C. *Energy Conversion*. Ebook (Electronic Edition), 2000. Disponível em <<http://www.personal.utulsa.edu/~kenneth-weston/>>. Acesso em: janeiro de 2006.

## APÊNDICE A - PLANILHAS DE BALANÇO DE VAPOR

### VS - VAPOR DE SUPERALTA PRESSÃO

<b>TOTAL GERADO (t)</b>	<b>1204.1</b>	<b>ERRO ABSOLUTO (t)</b>	<b>(3.8)</b>
<b>TOTAL CONSUMIDO (t)</b>	<b>1207.9</b>	<b>ERRO RELATIVO (%)</b>	<b>(0.3)</b>

#### GERAÇÃO (t/h)

<b>6GV1</b>	vazão	<b>0.0</b>
<b>6GV2</b>	vazão	<b>222.2</b>
<b>6GV3</b>	vazão	<b>233.4</b>
<b>UTILIDADES</b>		<b>455.7</b>

<b>1F12</b>	vazão	<b>224.4</b>
<b>1F13</b>	vazão	<b>218.0</b>
<b>1F16</b>	vazão	<b>38.0</b>
<b>PROCESSO 1</b>		<b>480.4</b>

<b>11F1</b>	vazão	<b>38.1</b>
<b>11F2</b>	vazão	<b>0.0</b>
<b>11F3</b>	vazão	<b>53.4</b>
<b>11F4</b>	vazão	<b>56.7</b>
<b>11F5</b>	vazão	<b>54.3</b>
<b>11F6</b>	vazão	<b>57.4</b>
<b>11F7</b>	vazão	<b>8.1</b>
<b>PROCESSO 2</b>		<b>268.0</b>

#### CONSUMO (t/h)

<b>6PV12</b>	balanço energético	<b>10.5</b>
<b>7TBG1</b>	vazão	<b>87.4</b>
<b>7TBG2</b>	vazão	<b>90.1</b>
<b>UTILIDADES</b>		<b>188.1</b>

<b>1PV51</b>	balanço energético	<b>31.1</b>
<b>2TBC1</b>	vazão	<b>198.8</b>
<b>2TBC21</b>	vazão	<b>213.9</b>
<b>3P17</b>	valor fixo	<b>0.0</b>
<b>3R2 A/B/C</b>	curva de válvula	<b>0.0</b>
<b>4TBC1</b>	vazão	<b>126.7</b>
<b>4TBC21</b>	vazão	<b>107.2</b>
<b>PROCESSO 1</b>		<b>677.7</b>

<b>12TBC1</b>	vazão	<b>267.7</b>
<b>14TBC1</b>	vazão	<b>13.4</b>
<b>14TBC2</b>	vazão	<b>55.5</b>
<b>PROCESSO 2</b>		<b>336.6</b>

<b>53P15</b>	vazão	<b>0.5</b>
<b>55P5</b>	vazão	<b>0.0</b>
<b>PROCESSO 3</b>		<b>0.5</b>

<b>PERDAS</b>	valor fixo	<b>5.0</b>
---------------	------------	------------

**VA - VAPOR DE ALTA PRESSÃO**

<b>TOTAL GERADO (t)</b>	<b>510.8</b>	<b>ERRO ABSOLUTO (t)</b>	<b>2.2</b>
<b>TOTAL CONSUMIDO (t)</b>	<b>508.6</b>	<b>ERRO RELATIVO (%)</b>	<b>0.4</b>

**GERAÇÃO (t/h)**

6PV12	vazão	11.3
7TBG1	vazão	31.9
7TBG2	vazão	31.4
<b>UTILIDADES</b>		<b>74.5</b>

1PV51	vazão	33.4
2TBC1	vazão	147.6
2TBC21	vazão	147.1
<b>PROCESSO 1</b>		<b>328.1</b>

12TBC1	vazão	108.2
<b>PROCESSO 2</b>		<b>108.2</b>

**CONSUMO (t/h)**

6PV13	balanço energético	7.9
6TBB1 B	valor fixo	0.5
6TBB1 D	valor fixo	14.6
6TBB1 E	valor fixo	0.5
6TBVT1	curva	0.5
6TBVT2 A	curva	0.5
6TBVT2 B	curva	12.2
6TBVT3 A	curva	0.5
6TBVT3 B	curva	0.5
6TBVT4 A	curva	0.5
6TBVT4 B	curva	0.5
6TBVT5 A	curva	0.5
6TBVT5 B	curva	0.5
8TBB1 B	valor fixo	15.2
8TBB1 C	valor fixo	15.2
8TBB1 D	valor fixo	15.2
9TBC1 C	valor fixo	0.6
77TBG1	vazão	8.3
88TBB1 AB	vazão	30.7
<b>UTILIDADES</b>		<b>124.7</b>

1PV52	balanço energético	42.1
1MT10	vazão	0.4
1T6	vazão	0.2
1TBB2 A	valor fixo	15.1
1TBB2 B	valor fixo	15.1
1TBB6 A	valor fixo	16.7
2P62	balanço energético	0.0
4TBC2	vazão	61.1
4TBC22	vazão	62.2
<b>PROCESSO 1</b>		<b>213.0</b>

11MT7	vazão	1.0
11P8	vazão	26.4
11T5	vazão	0.0
11TBB1 B	curva	3.5
11TBB7 B	curva	9.2
11TBB9 B	curva	14.0
11TBB14 B	curva	2.5
12P8	balanço energético	0.0
<b>PROCESSO 2</b>		<b>56.6</b>

ÁREA 53	vazão	21.0
ÁREA 55	vazão	2.1
522P11	vazão	2.6
522V05	vazão	0.0
<b>PROCESSO 3</b>		<b>25.7</b>

Empresa A	vazão	13.5
Empresa B	vazão	15.6
Empresa C	vazão	4.4
Empresa D	vazão	21.5
Empresa E	vazão	9.6
Empresa F	vazão	17.7
Empresa G	vazão	1.2
<b>EXPORTAÇÕES</b>		<b>83.6</b>

PERDAS	valor fixo	5.0
--------	------------	-----

### VM - VAPOR DE MÉDIA PRESSÃO

TOTAL GERADO (t)	522.6	ERRO ABSOLUTO (t)	7.0
TOTAL CONSUMIDO (t)	515.6	ERRO RELATIVO (%)	1.3

#### GERAÇÃO (t/h)

6PV13	vazão	8.4
6TBVT1	curva	0.5
6TBVT2 A	curva	0.5
6TBVT2 B	curva	12.2
6TBVT3 A	curva	0.5
6TBVT3 B	curva	0.5
6TBVT4 A	curva	0.5
6TBVT4 B	curva	0.5
6TBVT5 A	curva	0.5
6TBVT5 B	curva	0.5
<b>UTILIDADES</b>		<b>24.6</b>

1PV52	vazão	44.9
1TBB2 A	valor fixo	15.1
1TBB2 B	valor fixo	15.1
1TBB6 A	valor fixo	16.7
4TBC1	vazão	71.1
4TBC21	vazão	52.3
4TBC2	vazão	61.1
4TBC22	vazão	62.2
<b>PROCESSO 1</b>		<b>338.5</b>

12TBC1	vazão	159.5
<b>PROCESSO 2</b>		<b>159.5</b>

#### CONSUMO (t/h)

6GV1/2/3	valor fixo	6.3
6P1	valor fixo	40.8
6P11/12/13	valor fixo	0.0
6PV14	balanço energético	31.7
6TBB4A	valor fixo	5.6
7E1/2/3	valor fixo	0.2
7E4/5/6	valor fixo	0.2
7TBB1 B	valor fixo	3.0
7TBB2 B	valor fixo	3.0
7TBB3 B	valor fixo	0.1
7TBB4 B	valor fixo	0.1
8TBB51 B	valor fixo	0.1
9P3 A/B/C	valor fixo	0.1
65P3 A/B	valor fixo	6.3
65P11	valor fixo	0.0
65P12	valor fixo	2.4
65TBB1 B	valor fixo	2.1
65TBB2 B	valor fixo	3.8
74TBB1 C	valor fixo	0.5
77T1	valor fixo	0.0
98TBB2 A	valor fixo	3.3
Sist. Cera	valor fixo	0.0
<b>UTILIDADES</b>		<b>109.7</b>

1PV13	balanço energético	31.1
1P23 A/B	vazão	81.4
1P24	vazão	0.0
1T1	valor fixo	0.0
1T2	vazão	1.3
1TBB1 D	valor fixo	10.6
1TBB9 B	valor fixo	5.6
1TBB27 B	valor fixo	3.5
1V43	valor fixo	1.0
2E1 2 /21 22	valor fixo	0.4
2E3	valor fixo	1.3
2TBB6/26	valor fixo	2.9
2TBB11/31	valor fixo	4.4
3P44	balanço	0.0
4E1 2/21 22	valor fixo	0.4
4TBB 1/21	valor fixo	3.3
4TBB 11/ 31	valor fixo	2.5
Flare 1	vazão	0.0
<b>PROCESSO 1</b>		<b>149.8</b>

11PV4	balanço energético	0.0
11P9	vazão	12.3
11P40	vazão	61.9
11T1	vazão	1.0
11T3	valor fixo	0.0
Area H	vazão	0.0
Reposição VD	vazão	26.3
<b>PROCESSO 2</b>		<b>101.5</b>

55F1	desativado	0.0
55TBB2 A	vazão	0.5
55TBB20 A	diferença	0.2
55TBB21 A		0.0
551E1	vazão	0.0
551F1	vazão	0.9
551F51	vazão	0.0
551P6	vazão	4.4
551P8	vazão	3.3
551P17	vazão	0.7
551P54	vazão	5.1
552P07	vazão	1.9
552P12	vazão	1.4
562P04	vazão	1.7
562R01 A/B/C	vazão	0.0
AREA 502	vazão	33.9
AREA 51	vazão	28.1
AREA 52	vazão	27.0
AREA 53	vazão	0.0
<b>PROCESSO 3</b>		<b>109.1</b>

Empresa A	vazão	0.7
Empresa H	vazão	25.4
Empresa F	vazão	14.1
Empresa I	valor fixo	0.4
<b>EXPORTAÇÕES</b>		<b>40.6</b>

PERDAS	valor fixo	5.0
--------	------------	-----

## VB - VAPOR DE BAIXA PRESSÃO

TOTAL GERADO (t)	337.1	ERRO ABSOLUTO (t)	28.4
TOTAL CONSUMIDO (t)	365.6	ERRO RELATIVO (%)	8.4
PERDA EM ALÍVIOS (t)	0.0		

## GERAÇÃO (t/h)

6PV14	vazão	34.0
6TBB4 A	valor fixo	5.6
6TBB1 B	curva	0.5
6TBB1 D	curva	14.6
6TBB1 E	curva	0.5
7TBB1 A	valor fixo	3.0
7TBB2 A	valor fixo	3.0
7TBB3 A	valor fixo	0.1
7TBB4 A	valor fixo	0.1
8TBB1 B	curva	15.2
8TBB1 C	curva	15.2
8TBB1 D	curva	15.2
8TBB51 B	valor fixo	0.1
9TBC1 C	valor fixo	0.6
65TBB1 B	valor fixo	2.1
65TBB2 B	valor fixo	3.8
88TBB1 AB	vazão	30.7
88TBB2 A	valor fixo	3.3
6V1/66V15	cálculo	13.2
<b>UTILIDADES</b>		<b>160.7</b>

11PV13	vazão	33.4
11V5	cálculo	0.6
11TBB1 D	valor fixo	10.6
11TBB9 D	valor fixo	5.6
11TBB27 B	valor fixo	3.5
2TBB6 26	valor fixo	2.9
2TBB11 31	valor fixo	4.4
4TBB1 21	valor fixo	3.3
4TBB11 31	valor fixo	2.5
<b>PROCESSO 1</b>		<b>66.9</b>

11PV4	vazão	0.0
11TBB1 B	curva	3.5
11TBB7 B	curva	9.2
11TBB9 B	curva	14.0
11TBB14 B	curva	2.5
44TBC1	vazão	13.4
44TBC2	vazão	55.5
11V1	cálculo	8.7
<b>PROCESSO 2</b>		<b>106.8</b>

55TBB2 A	vazão	0.5
55TBB2 A	vazão	0.2
AREA 55	vazão	2.1
(55TBC1)		
<b>AROMÁTICOS</b>		<b>2.8</b>

## ALÍVIOS (t/h)

6PV26 A/B	sequencial	0.0
11PV14 A/B	sequencial	0.0
11PV1 A/B	vazão	0.0
<b>PERDA EM ALÍVIOS</b>		<b>0.0</b>

## CONSUMO (t/h)

22P01	vazão	0.0
442P02	vazão	0.0
442TQ15	valor fixo	0.0
446V4 A/B/C	balanço mássico	156.0
446V9	valor fixo	0.0
65E01.	valor fixo	0.0
65V01	valor fixo	0.0
165P01	valor fixo	0.0
165P02	valor fixo	0.0
165TQ01/02	valor fixo	0.0
Sist. Ar Cond.	desconsiderado	0.0
Sist. Cera	valor fixo	1.0
<b>UTILIDADES</b>		<b>157.0</b>

1E3.	valor fixo	0.0
1E4.	vazão	11.0
1E5.	vazão	0.0
1E6.	vazão	18.7
1E7.	cálculo	1.7
1E8.	vazão	14.0
Injeção de AD	balanço	(1.1)
1P3	valor fixo	0.7
1F1 a 11	valor fixo	2.2
1F12/13	valor fixo	0.4
1F16	valor fixo	0.2
1P27	valor fixo	0.0
1P28	valor fixo	0.0
1T03	valor fixo	0.0
1V33	valor fixo	0.0
2V12/32	valor fixo	0.0
3P16 A/B	valor fixo	0.0
3P32	valor fixo	0.1
3R01	valor fixo	0.0
3R02 A/B/C	curva de válvula	0.4
4E04/24	valor fixo	0.0
4V12/32	valor fixo	0.0
A64	vazão	11.8
<b>PROCESSO 1</b>		<b>61.2</b>

11AH01/02/03	valor fixo	0.2
11P01	valor fixo	2.8
11P02	valor fixo	3.1
11V04	valor fixo	0.0
11V06	valor fixo	0.5
11F01 a 07	valor fixo	1.4
11P02	valor fixo	0.4
11P36	vazão	6.6
11T04	valor fixo	0.0
11T06	valor fixo	0.0
11T07	valor fixo	0.0
12P15	vazão	1.3
13P52	vazão	0.0
15P01	vazão	0.1
A164	vazão	7.3
<b>PROCESSO 2</b>		<b>23.6</b>

52V22	valor fixo	0.0
54F1	valor fixo	0.0
54R1	valor fixo	0.0
532TQ08/09	valor fixo	0.1
532TQ12	valor fixo	0.0
535P03	valor fixo	0.4
536TQ09/10/11	valor fixo	0.1
537P1	valor fixo	1.7
537P3	valor fixo	0.4
561SO3 A/B	valor fixo	0.1
561SO4 A/B	valor fixo	0.1
561TQ1	valor fixo	0.4
561TQ2	valor fixo	0.4
561TQ3 A/B	valor fixo	0.2
551F1/51	valor fixo	0.0
551P2	vazão	0.3
551U10	vazão	0.1
532TQ16	valor fixo	0.0
562P1	vazão	0.2
562P2	valor fixo	0.0
562P3	vazão	0.9
562P10	vazão	0.3
AREA 503	vazão	13.1
AREA 504	vazão	32.4
AREA 505	vazão	0.8
AREA 51	vazão	0.0
AREA 52/53	vazão	0.0
AREA 552	vazão	5.0
URV	valor fixo	0.0
<b>PROCESSO 3</b>		<b>56.9</b>

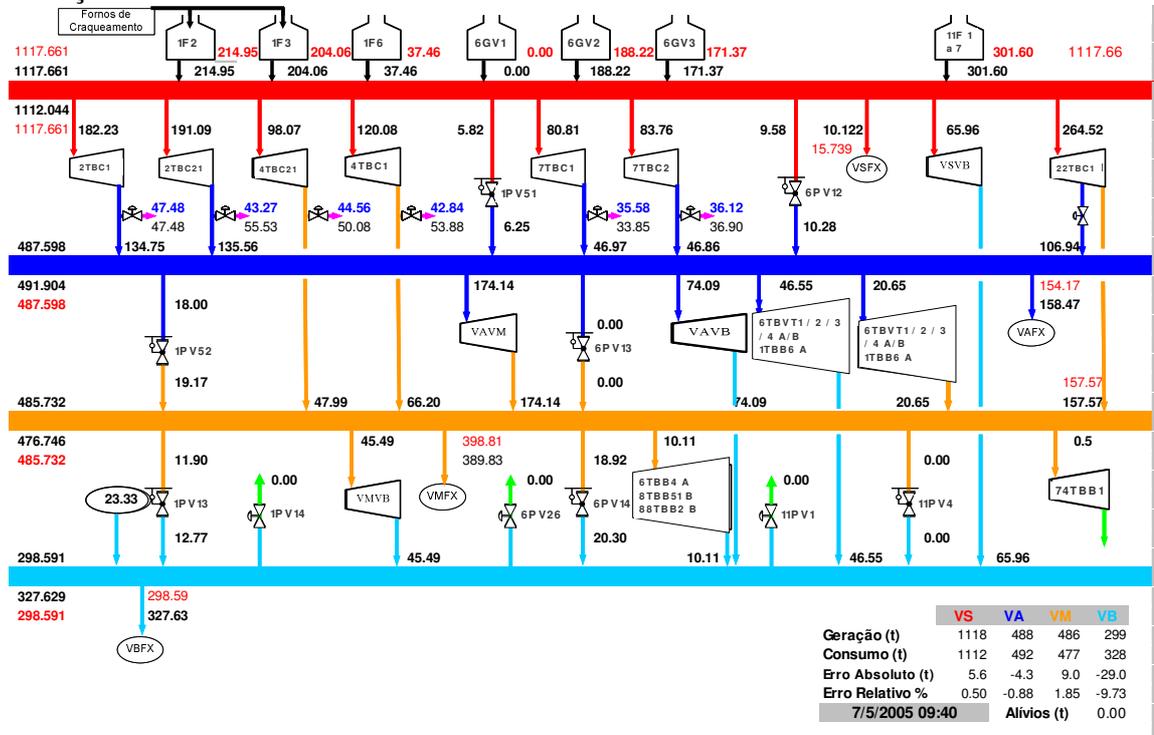
Indústria C	vazão	64.9
<b>EXPORTAÇÕES</b>		<b>64.9</b>

PERDAS	valor fixo	2.0
--------	------------	-----

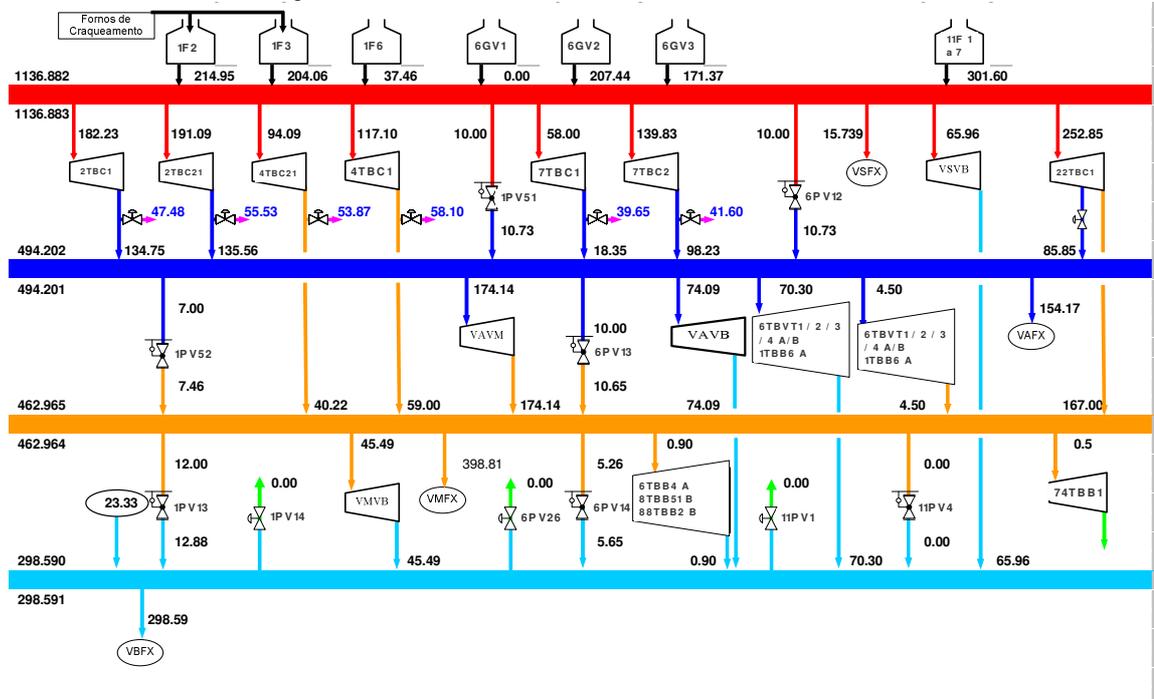
# APÊNDICE B – RESULTADOS PARA CASO 3

## B1- SITUAÇÃO DE 7 DE MAIO DE 2005

### Situação real

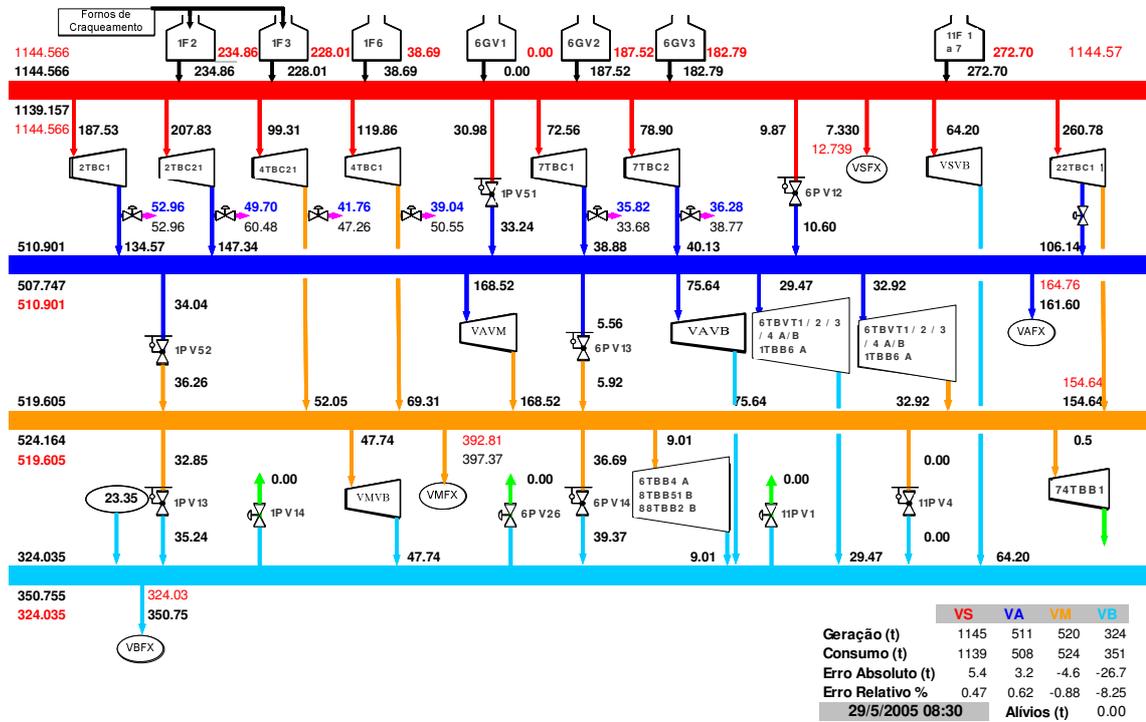


### Resultados da otimização

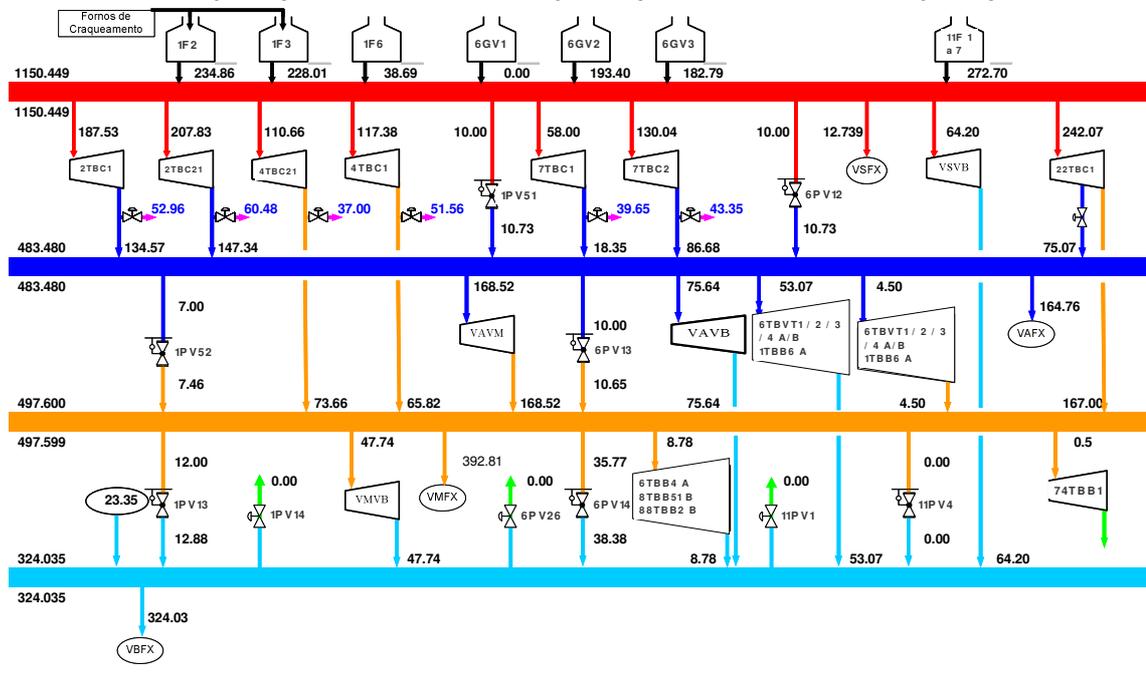


## B2- SITUAÇÃO DE 29 DE MAIO DE 2005

### Situação real

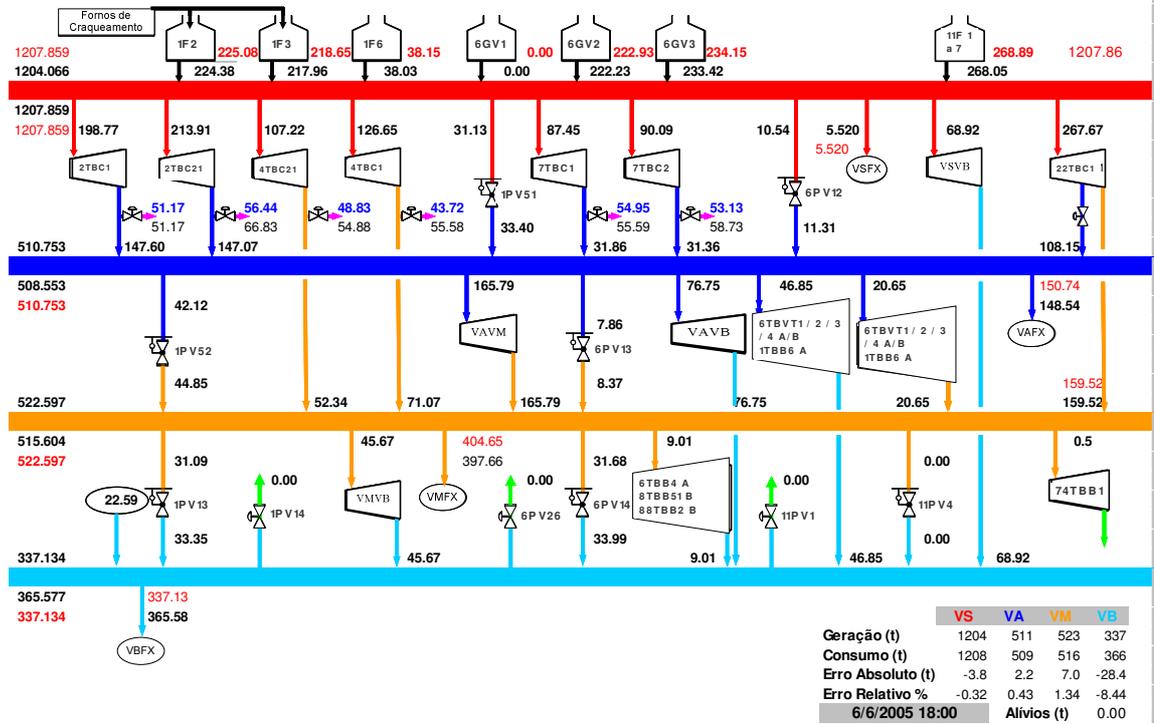


### Resultados da otimização

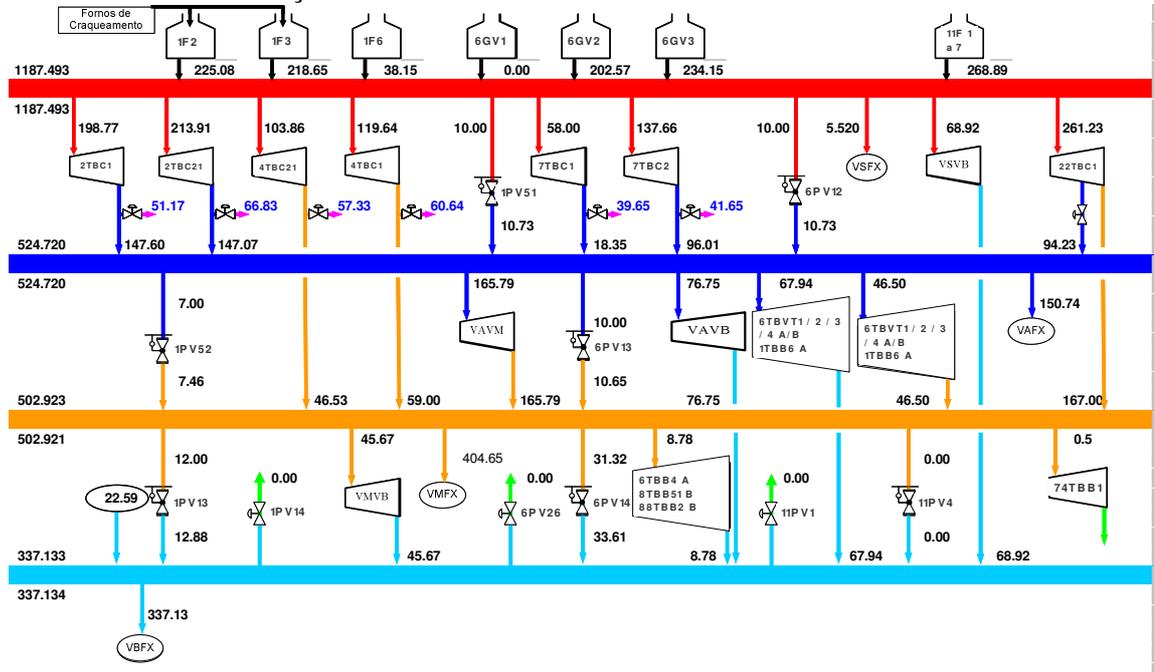


## B3- SITUAÇÃO DE 6 DE JUNHO DE 2005

### Situação Real

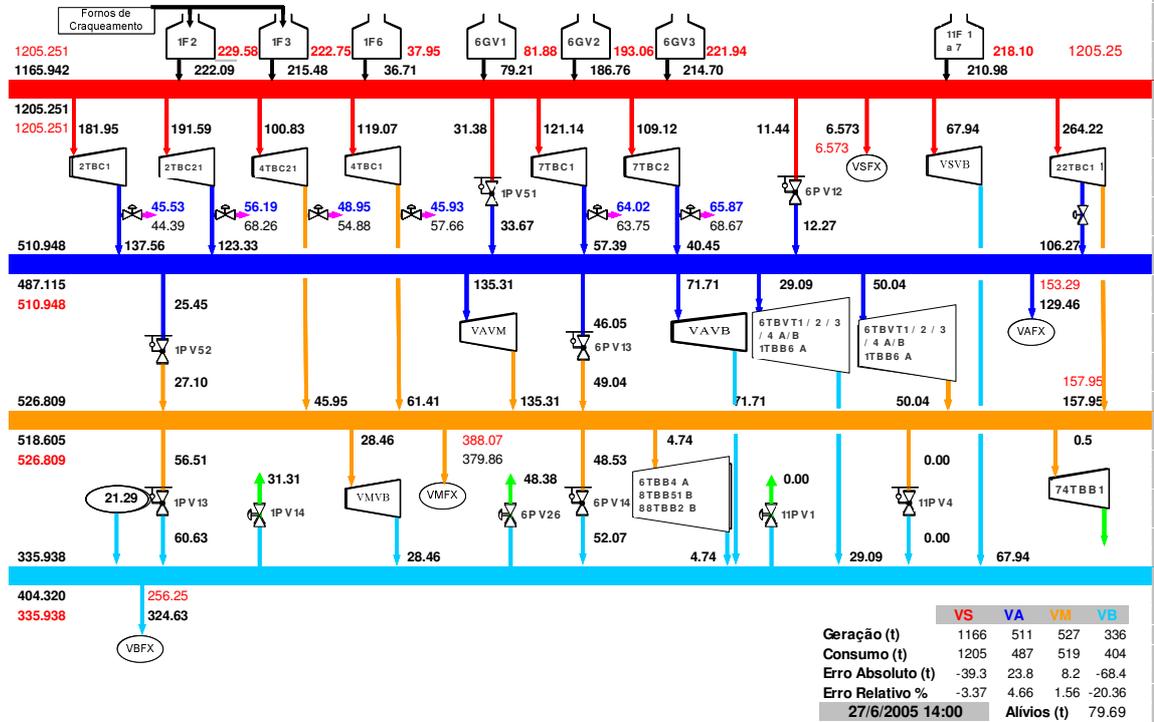


### Resultados da otimização

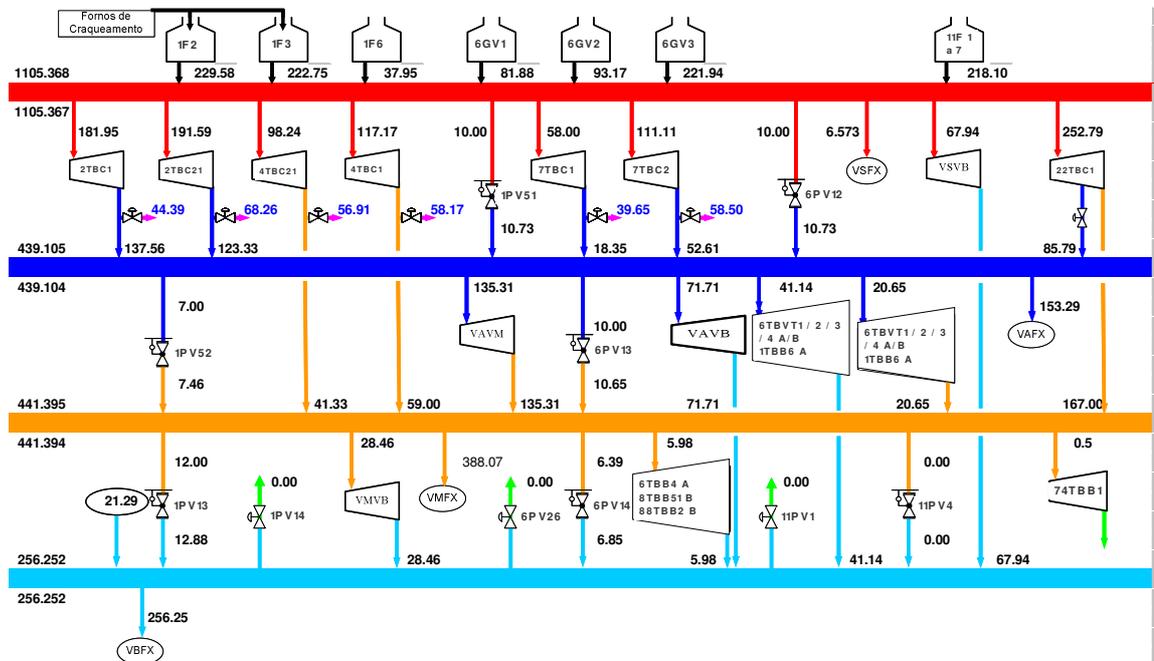


## B4- SITUAÇÃO DE 27 DE JUNHO DE 2005

### Situação real

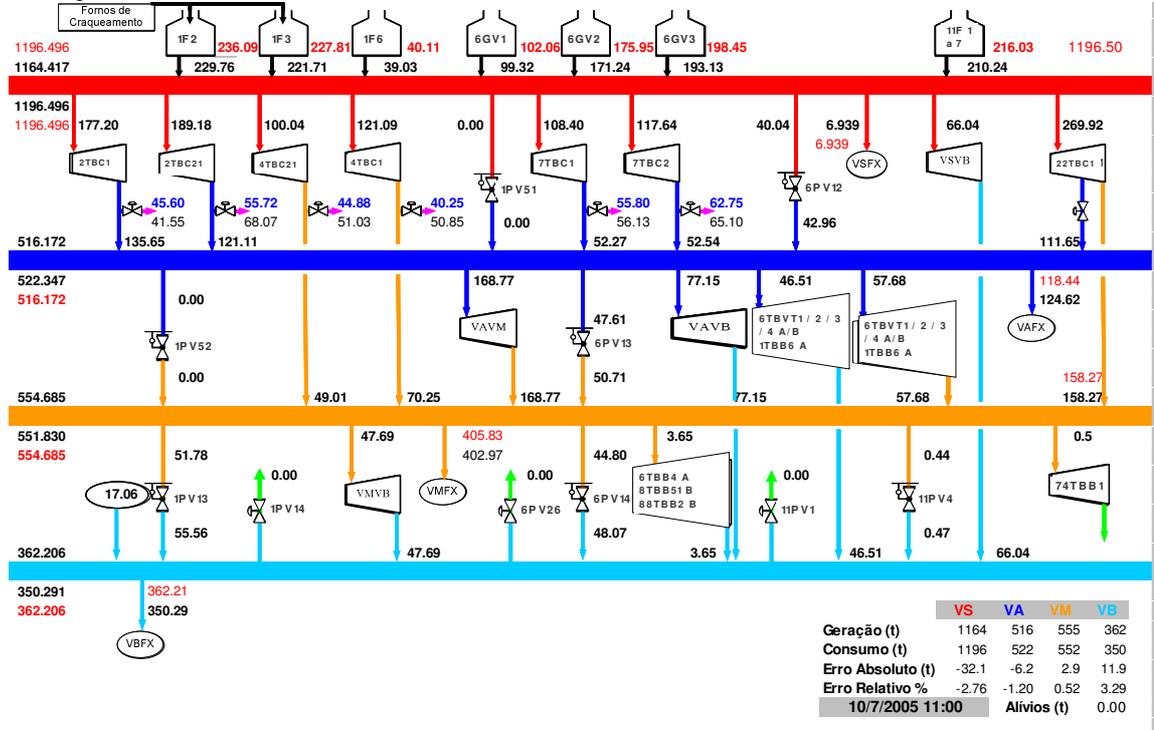


### Resultados da otimização

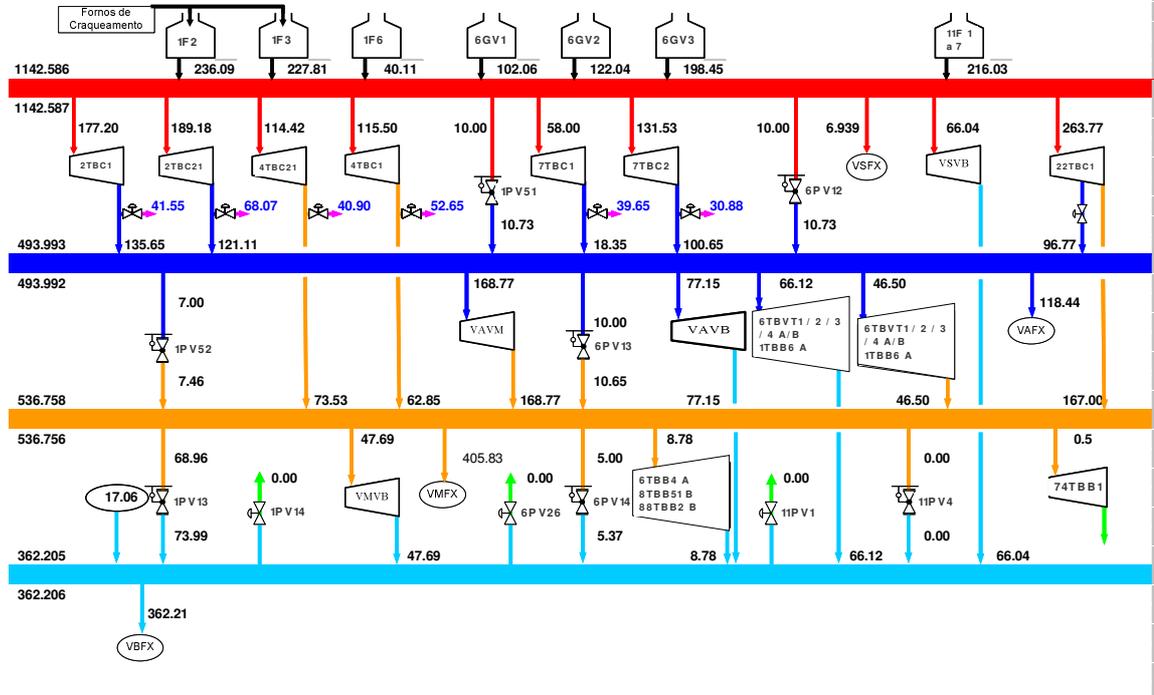


## B5- SITUAÇÃO DE 10 DE JULHO DE 2005

### Situação real

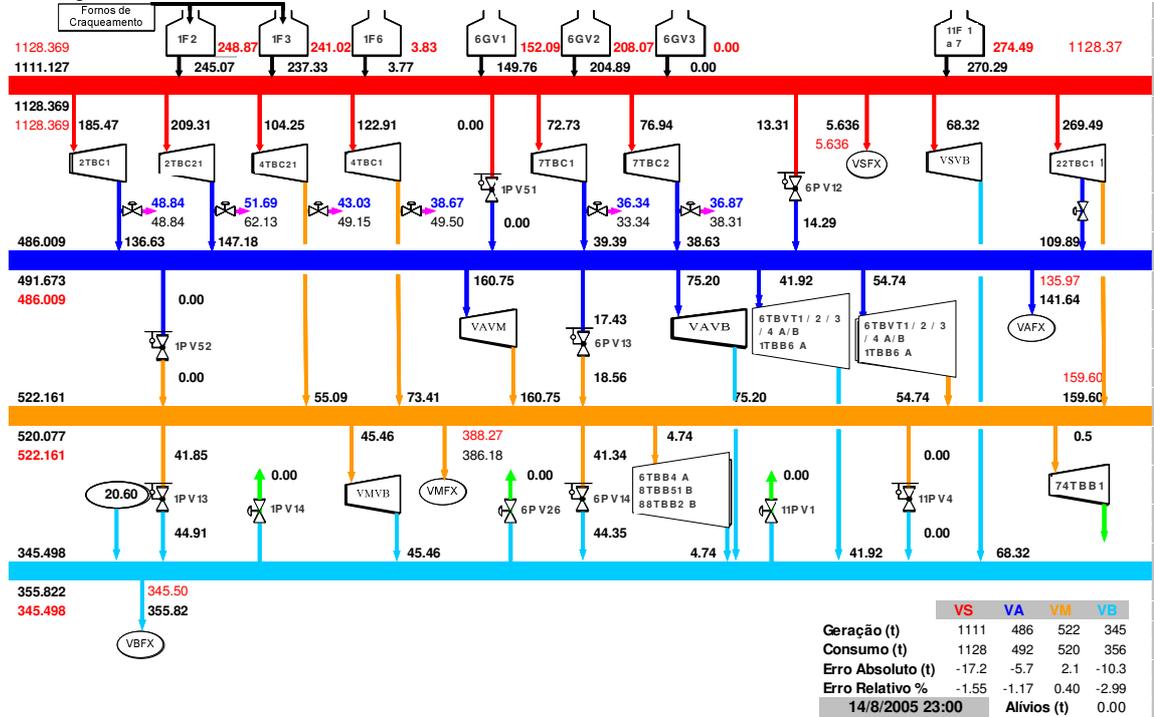


### Resultados da otimização

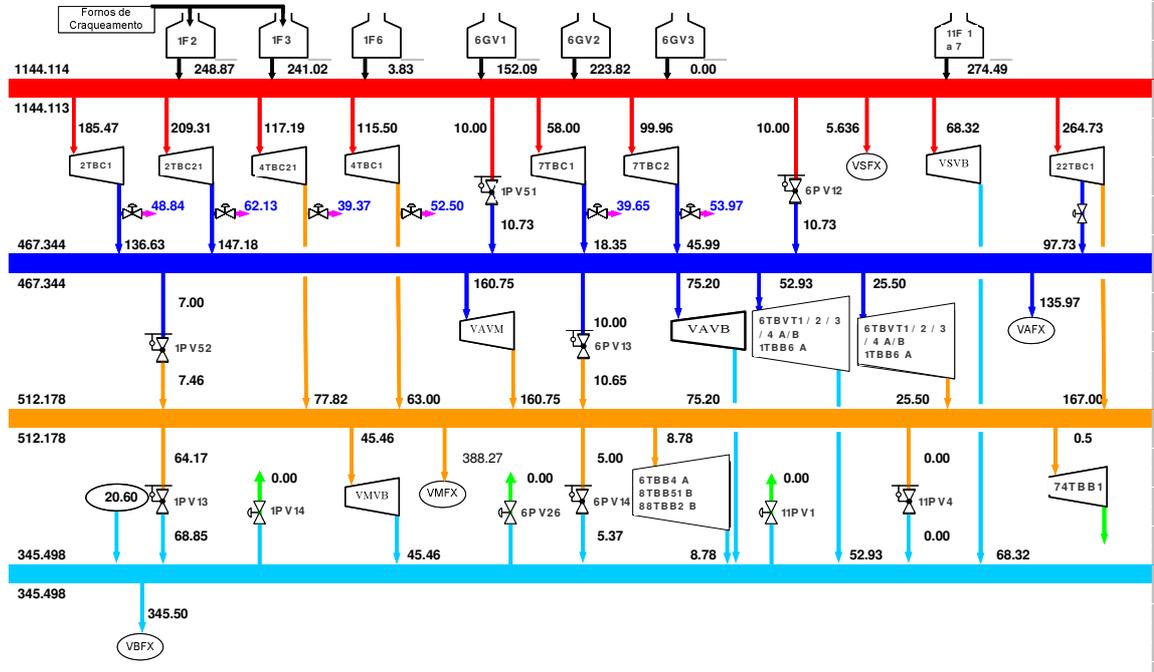


## B6- SITUAÇÃO DE 14 DE AGOSTO DE 2005

### Situação real

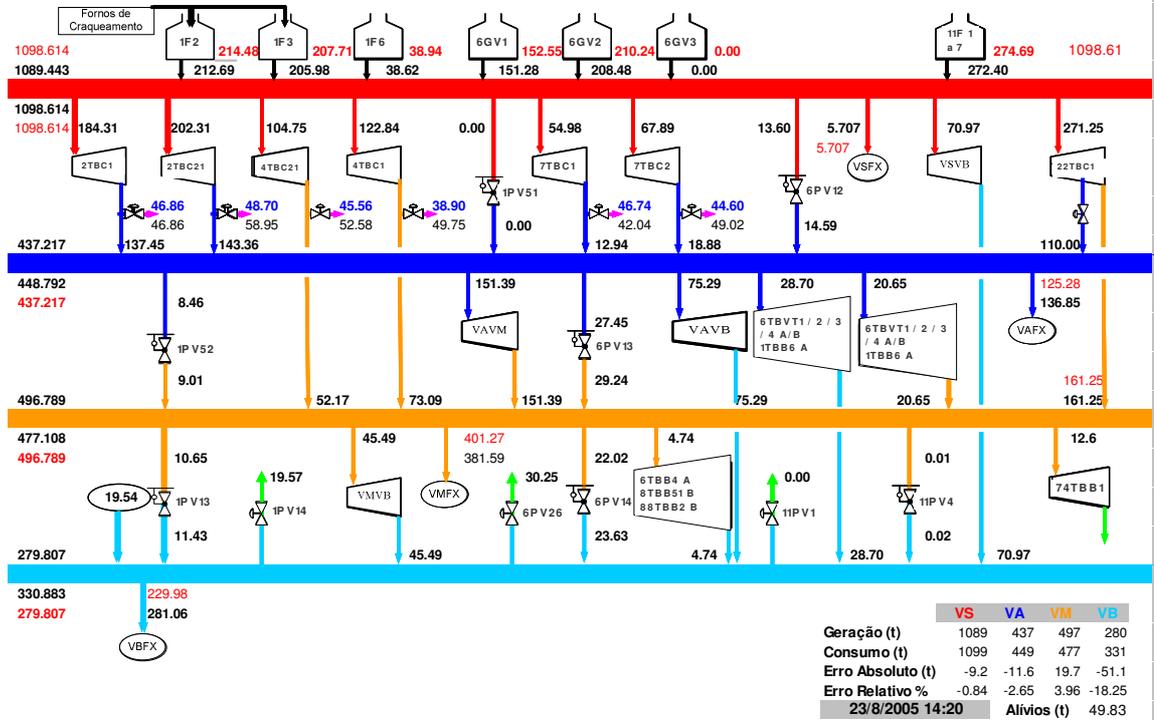


### Resultados da otimização

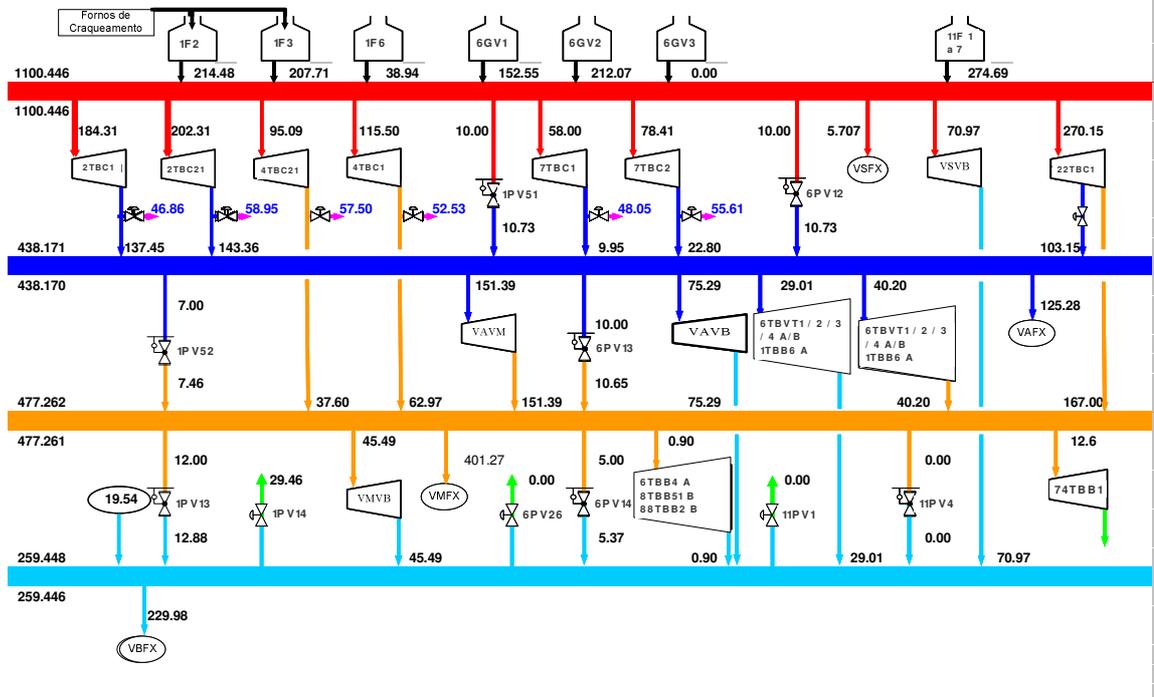


## B7- SITUAÇÃO DE 23 DE AGOSTO DE 2005

### Situação real

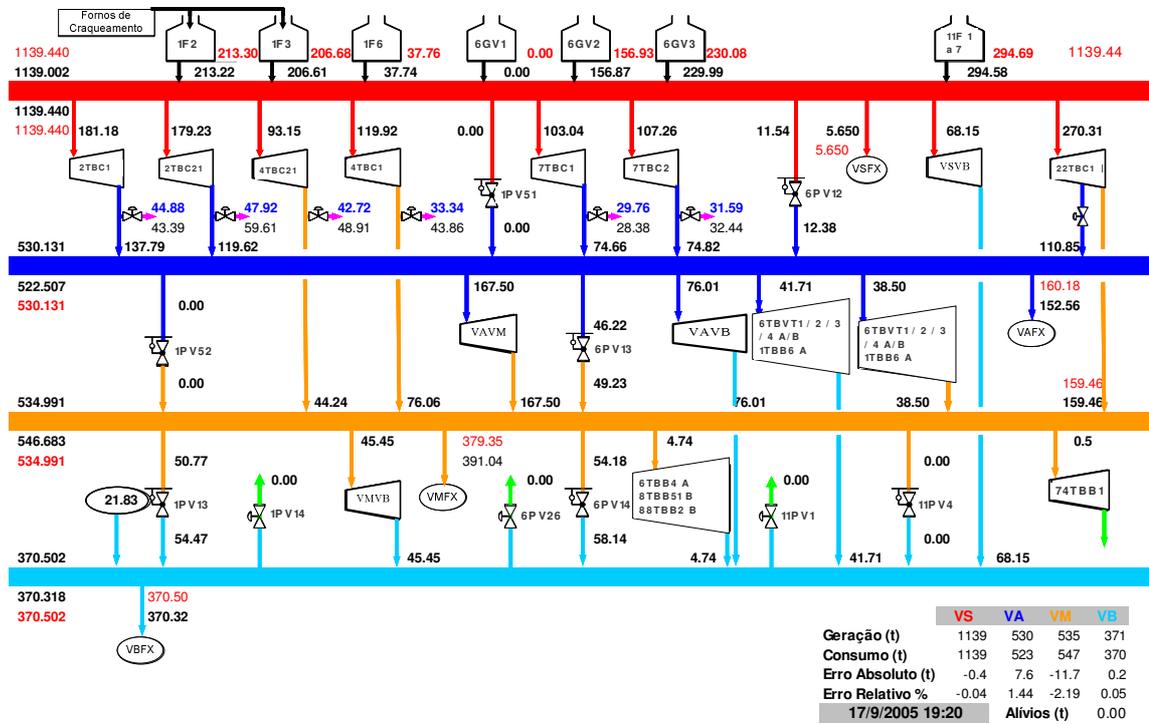


### Resultados da otimização

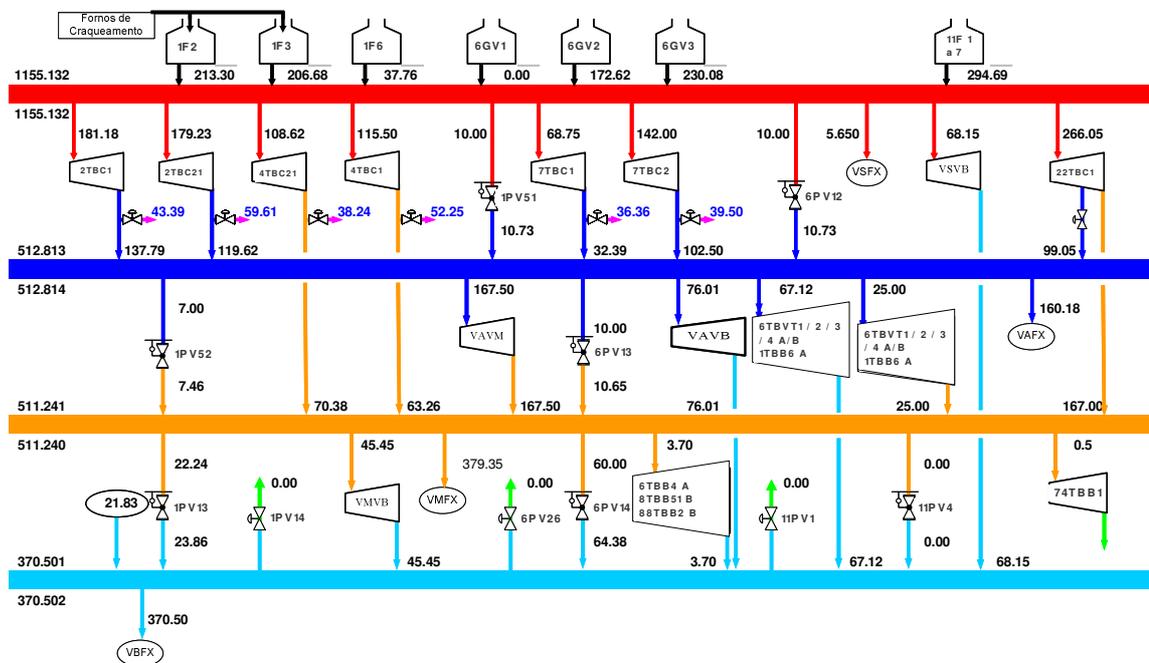


## B8- SITUAÇÃO DE 17 DE SETEMBRO DE 2005

### Situação real

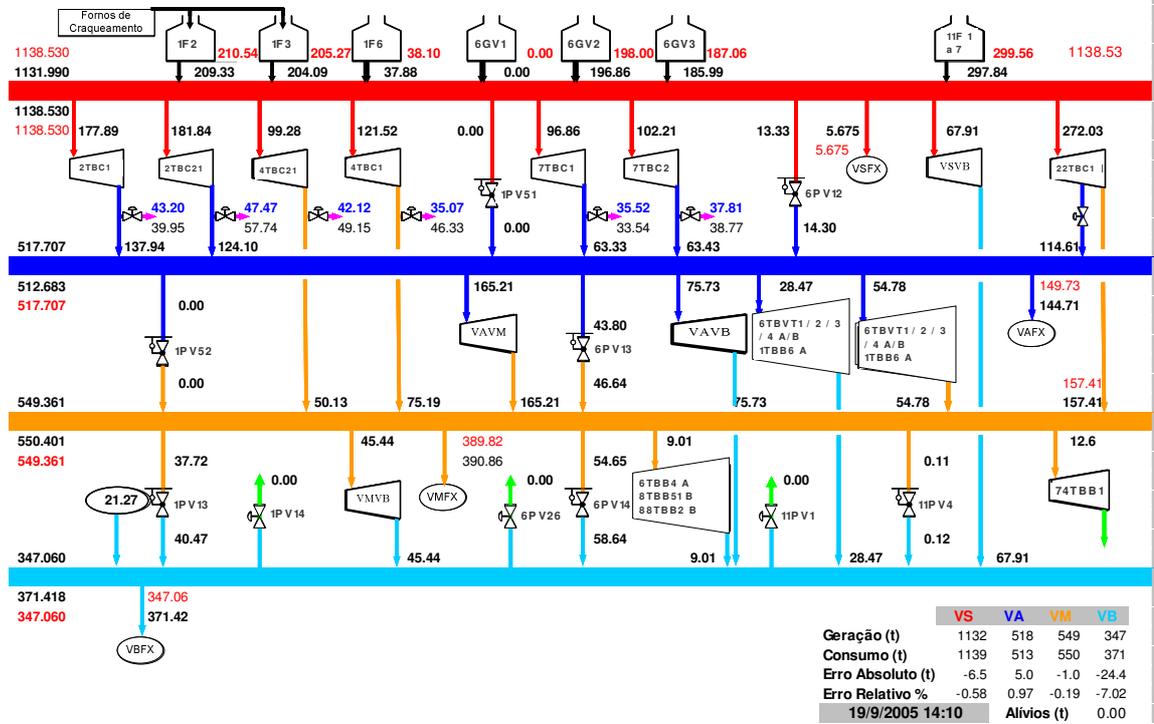


### Resultados da otimização

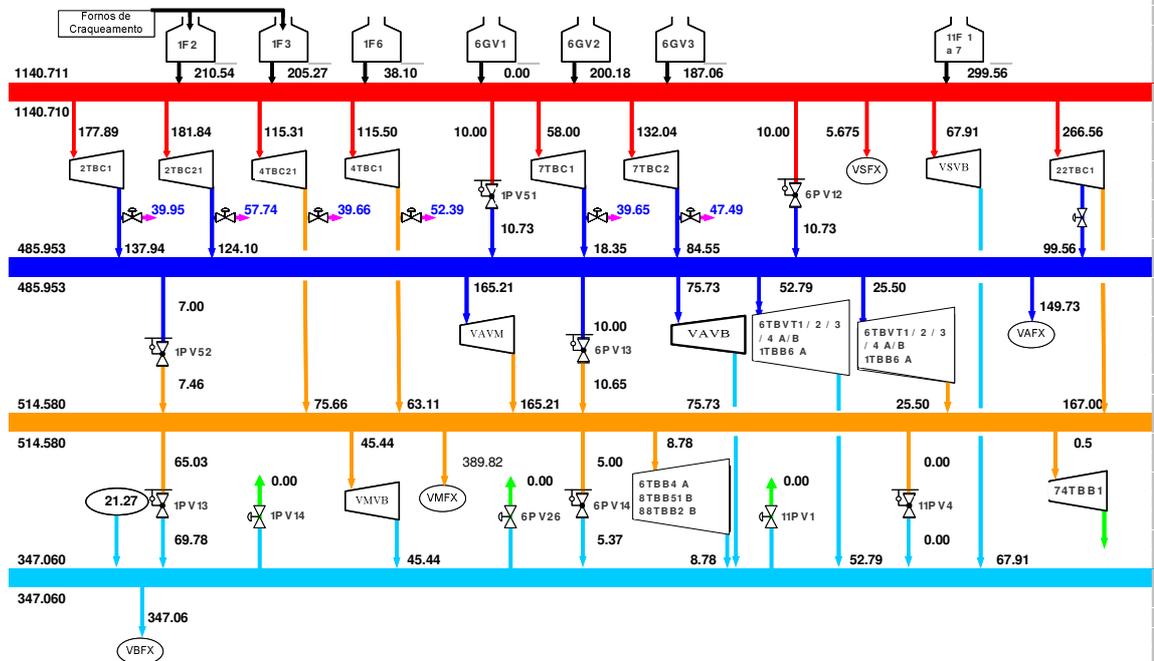


## B9- SITUAÇÃO DE 19 DE SETEMBRO DE 2005

### Situação real

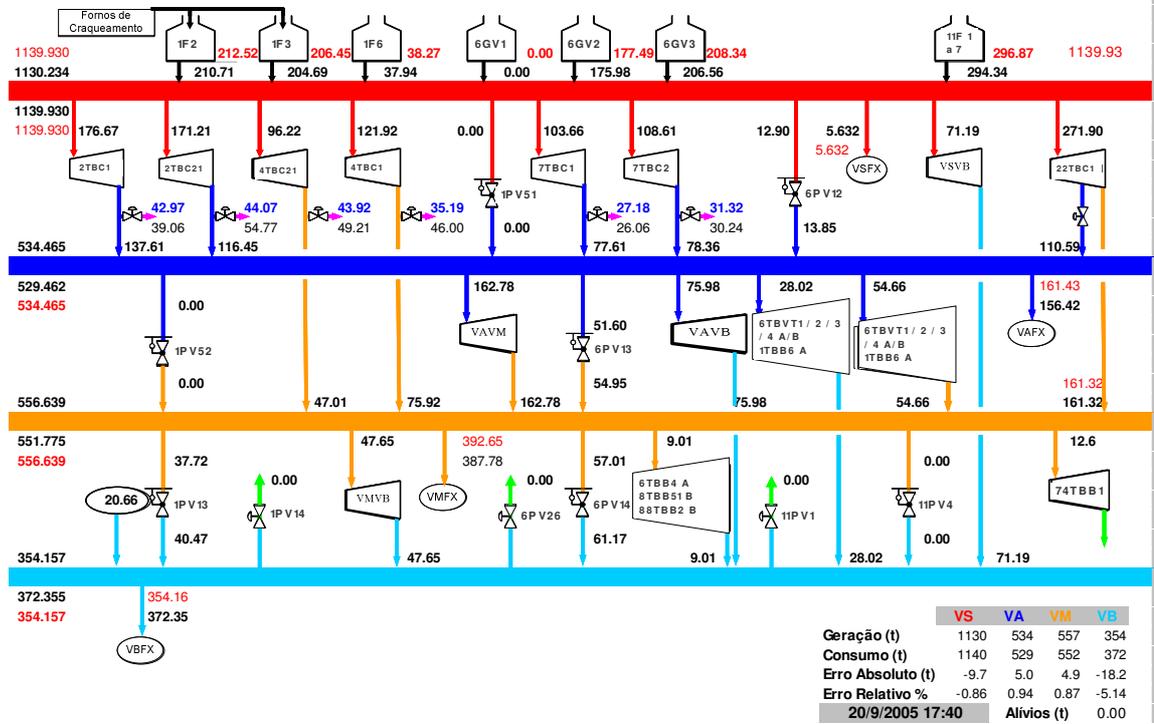


### Resultados da otimização

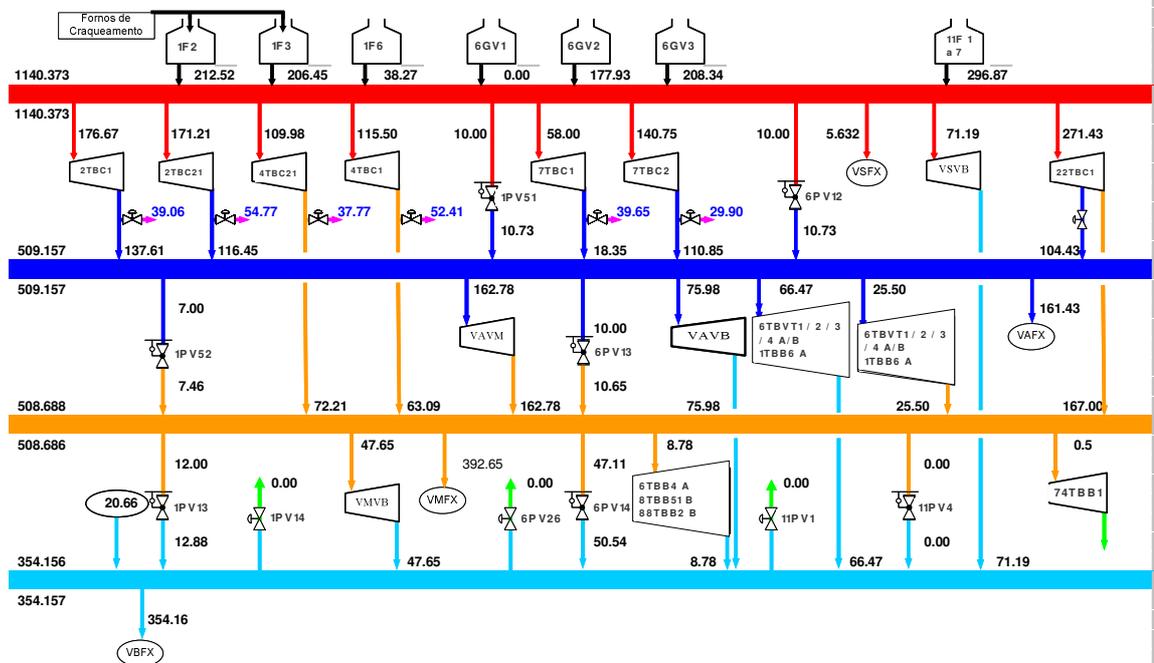


## B10 - SITUAÇÃO DE 20 DE SETEMBRO DE 2005

### Situação real

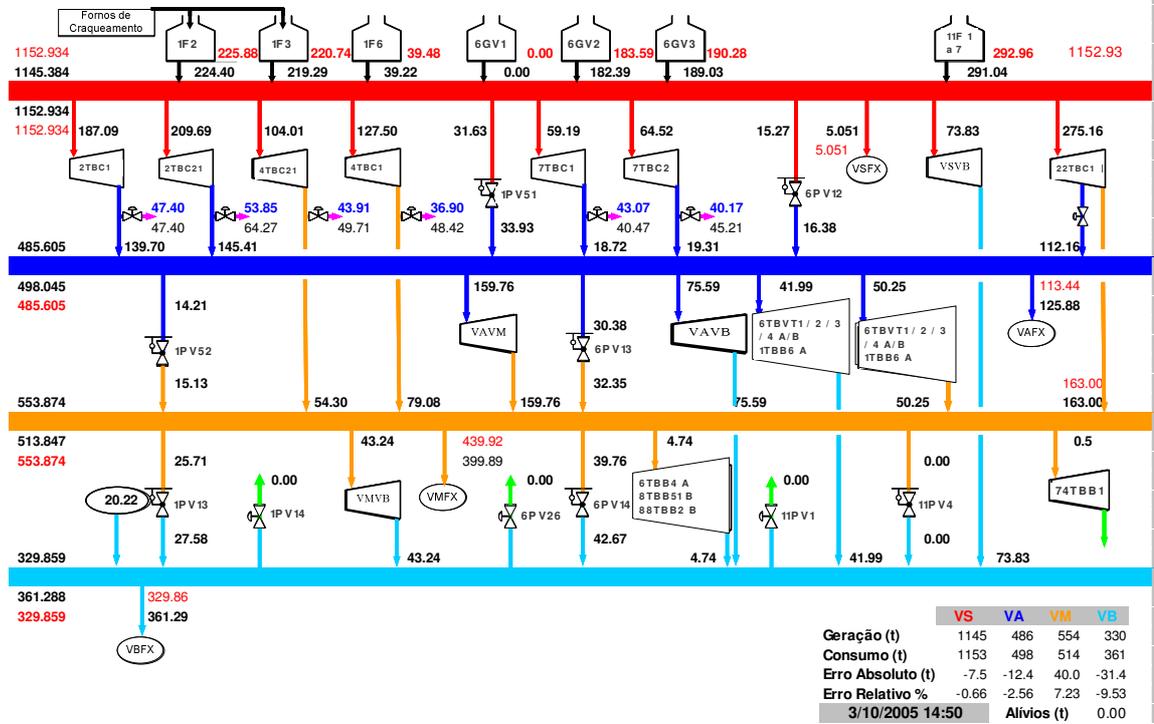


### Resultados da otimização

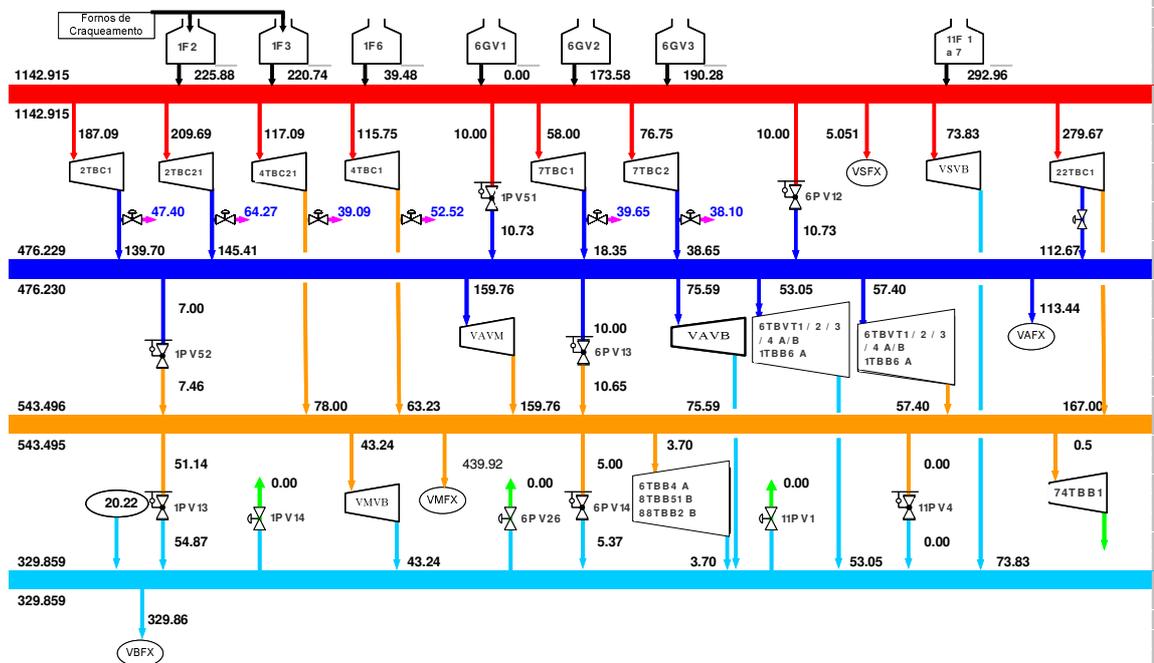


## B11- SITUAÇÃO DE 3 DE OUTUBRO DE 2005

### Situação real

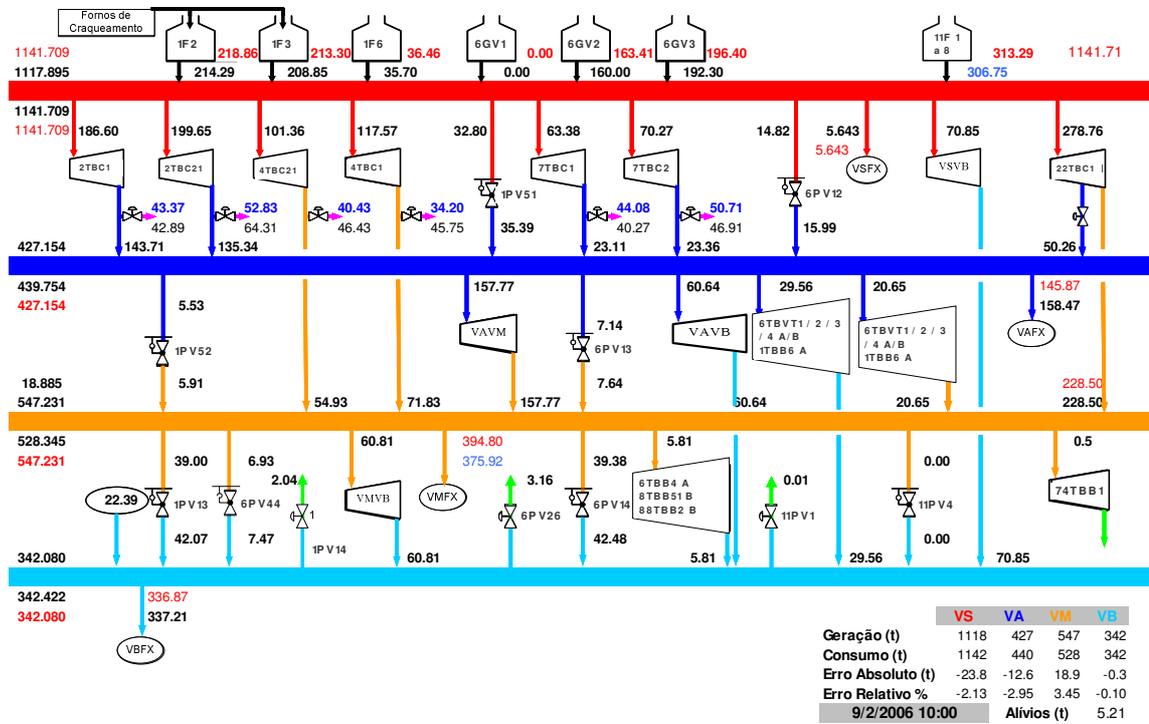


### Resultados da otimização

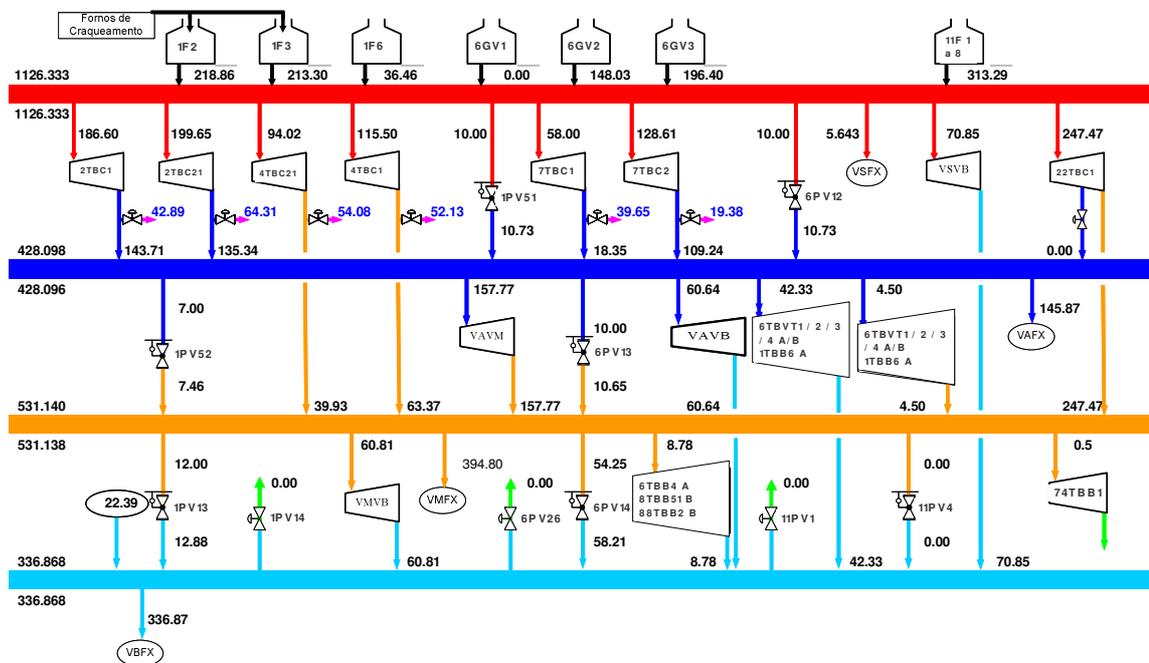


## B12- SITUAÇÃO DE 9 DE FEVEREIRO DE 2006

### Situação real

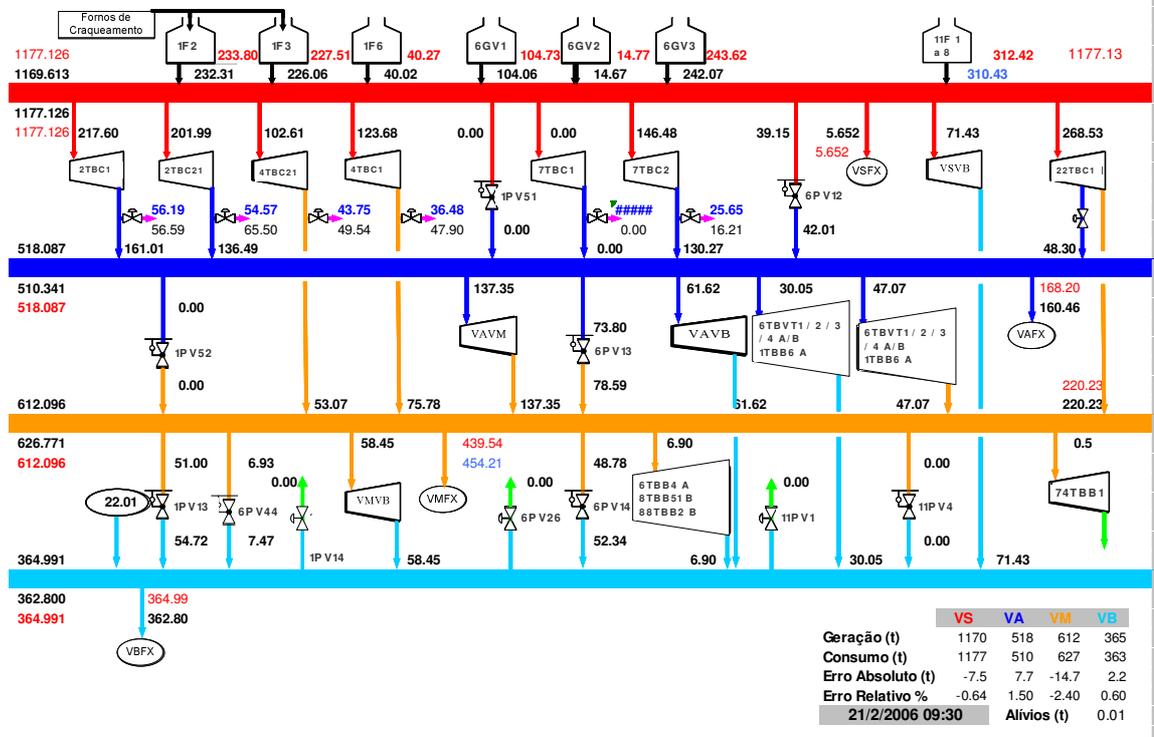


### Resultados da otimização

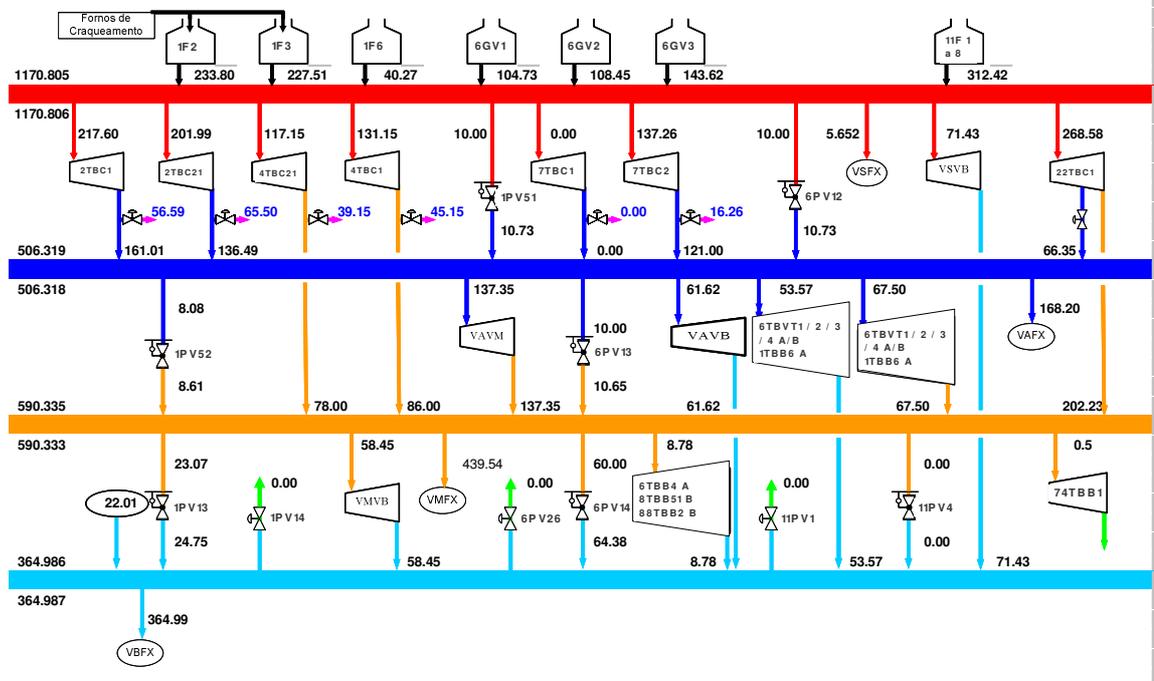


# B13- SITUAÇÃO DE 21 DE FEVEREIRO DE 2006

## Situação real

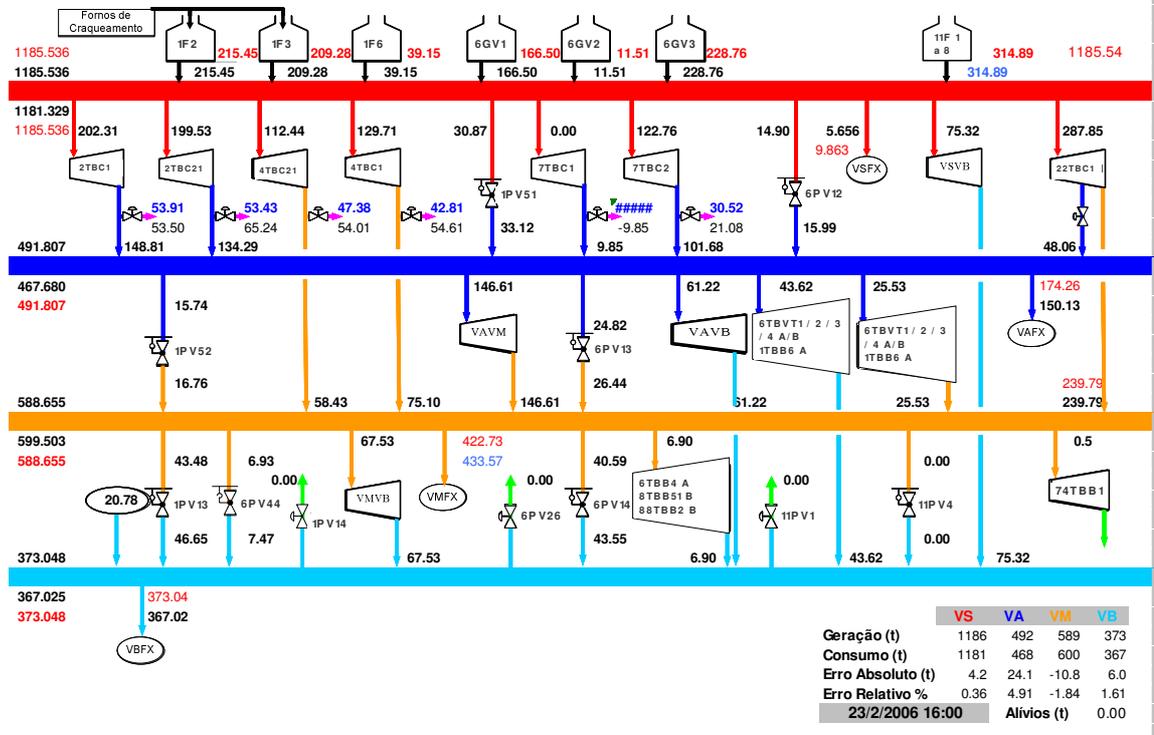


## Resultados da otimização

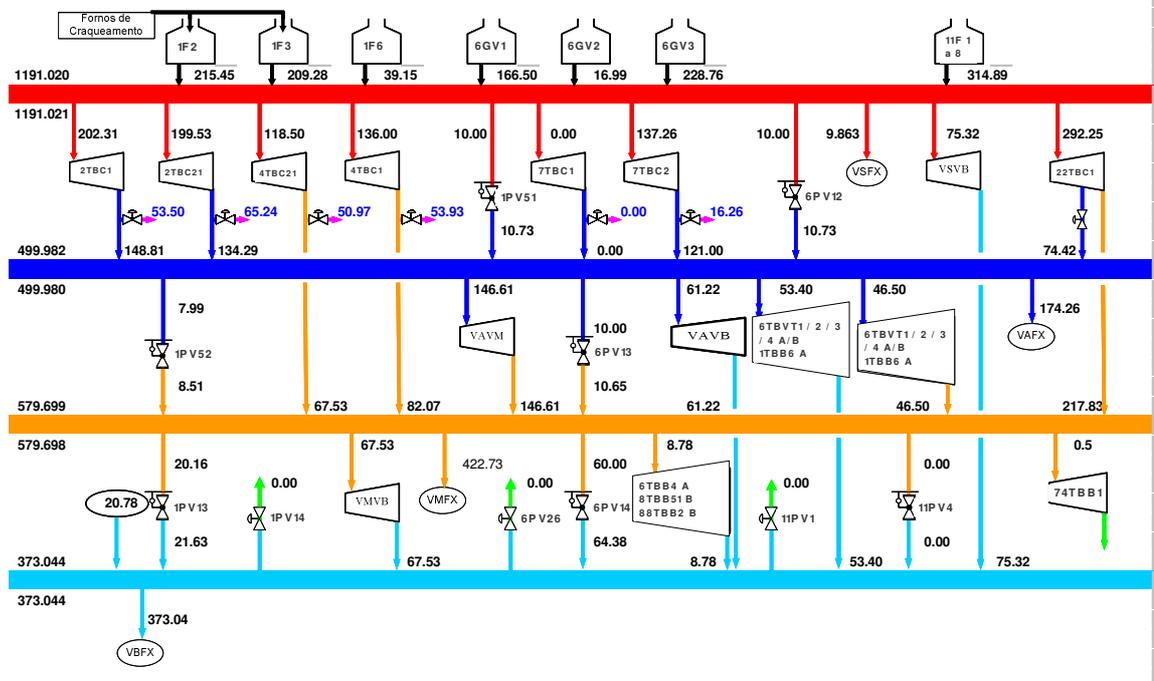


# B14- SITUAÇÃO DE 23 DE FEVEREIRO DE 2006

## Situação real



## Resultados da otimização



## APÊNDICE C: RESULTADOS DOS CINCO CASOS DE OTIMIZAÇÃO

### C1- SITUAÇÃO DE 7 DE MAIO DE 2005

	Casos de Otimização					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Carga 7TG1 (MW)	9.1	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga 7TG2 (MW)	9.4	13.3	14.2	14.2	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	30.1	30.0	30.0	30.0	37.0	37.4
EEimportada (MW)	8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 1PV14 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 6PV26 (t/h)	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 11PV1 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VS Redutora 6PV12 (t/h)	9.6	15.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VS Redutora 1PV51 (t/h)	5.8	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 6PV13 (t/h)	0.0	0.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 1PV52 (t/h)	18.0	0.0	5.0	7.0	10.0	5.0
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	11.9	0.3	10.0	12.0	20.0	10.0
VM Redutora 6PV14 (t/h)	18.9	0.0	5.0	5.3	15.0	5.5
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	120.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	66.2	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	98.1	99.5	98.9	94.1	107.5	100.5
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	48.0	49.3	48.2	40.2	62.6	50.9
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	80.8	58.0	58.4	58.0	58.0	58.0
7TG1 - Extração de VA (t/h)	47.0	18.4	18.9	18.4	18.4	23.6
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	83.8	127.5	142.0	139.8	103.0	113.4
7TG2 - Extração de VA (t/h)	46.9	86.2	101.4	98.2	74.4	93.5
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	264.5	252.8	252.8	252.8	252.8	252.8
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	106.9	85.8	85.8	85.8	85.8	85.8
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	46.5	80.6	70.3	70.3	43.4	67.2
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	20.7	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	10.1	8.8	3.7	0.9	8.8	6.0
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	359.6	376.9	376.2	378.8	348.1	341.1
Produção Total de VS (t/h)	1117.7	1134.9	1134.3	1136.9	1113.5	1106.9
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	11873.8	12444.1	12422.4	12508.4	11492.8	11262.9
Custo EE TBG (R\$/h)	2038.4	2032.2	2032.2	2032.2	2507.3	2530.6
Custo EE AES (R\$/h)	1160.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Custo EETGs (sem VS) (R\$/h)	113.0	135.9	141.5	141.8	109.8	97.6
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	70.5	114.5	45.8	91.6	91.6	45.8
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	49.7	0.0	27.6	46.9	55.2	27.6
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	197.9	2.1	96.3	110.8	224.4	99.2
Custo (R\$/h)	15503.8	14728.8	14765.8	14931.8	14481.1	14063.7
Redução de custo (%)	-	5.0%	4.8%	3.7%	6.6%	9.3%

## C2- SITUAÇÃO DE 29 DE MAIO DE 2005

Casos de Otimização						
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Carga 7TG1 (MW)	8.8	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga 7IG2 (MW)	9.1	13.2	13.5	13.9	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	28.9	30.0	30.0	30.0	34.9	36.9
EE importada (MW)	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 1PV14 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 6PV26 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 11PV1 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VS Redutora 6PV12 (t/h)	9.9	15.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VS Redutora 1PV51 (t/h)	31.0	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 6PV13 (t/h)	5.6	0.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 1PV52 (t/h)	34.0	0.0	5.0	7.0	10.0	5.0
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	32.8	47.8	10.0	12.0	20.0	5.0
VM Redutora 6PV14 (t/h)	36.7	0.0	37.8	35.8	27.8	42.8
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	119.9	115.5	115.5	117.4	115.5	122.5
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	69.3	63.1	63.1	65.8	63.1	73.3
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	99.3	110.6	109.7	110.7	110.4	110.7
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	52.0	73.5	72.0	73.7	73.2	73.7
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	72.6	58.0	58.0	58.0	58.0	58.0
7TG1 - Extração de VA (t/h)	38.9	18.4	18.4	18.4	18.4	23.6
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	78.9	126.5	140.1	130.0	114.2	107.2
7TG2 - Extração de VA (t/h)	40.1	85.3	102.3	86.7	89.7	85.1
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	260.8	242.1	242.1	242.1	242.1	242.1
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	106.1	75.1	75.1	75.1	75.1	75.1
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	29.5	53.1	53.1	53.1	53.1	53.1
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	32.9	25.5	16.4	4.5	4.5	4.5
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	9.0	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	370.3	375.6	373.4	376.2	353.1	341.2
Produção Total de VS (t/h)	1144.6	1149.9	1147.6	1150.4	1132.5	1122.7
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	12227.6	12404.0	12328.9	12421.9	11660.6	11266.7
Custo EE TBG (R\$/h)	1958.1	2032.2	2032.2	2032.2	2363.0	2498.5
Custo EE AES (R\$/h)	1300.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Custo EETGs (sem VS) (R\$/h)	109.1	135.3	137.2	139.6	109.8	97.6
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	187.1	114.5	45.8	91.6	91.6	45.8
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	109.3	0.0	27.6	46.9	55.2	27.6
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	446.4	306.7	306.7	306.7	306.7	306.7
Custo (R\$/h)	16338.1	14992.6	14878.4	15038.9	14586.9	14242.9
Redução de custo (%)	-	8.2%	8.9%	8.0%	10.7%	12.8%

### C3- SITUAÇÃO DE 6 DE JUNHO DE 2005

Casos de Otimização						
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Carga 7TG1 (MW)	13.3	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga 7TG2 (MW)	13.6	13.6	13.9	14.1	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	31.3	30.0	30.0	30.0	36.5	38.0
EE importada (MW)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 1PV14 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 6PV26 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 11PV1(t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VS Redutora 6PV12 (t/h)	10.5	15.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VS Redutora 1PV51 (t/h)	31.1	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 6PV13 (t/h)	7.9	0.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 1PV52 (t/h)	42.1	0.0	5.0	7.0	10.0	5.0
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	31.1	43.3	10.0	12.0	20.0	10.0
VM Redutora 6PV14 (t/h)	31.7	0.0	33.3	31.3	23.3	33.3
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	126.7	119.6	119.6	119.6	131.1	127.3
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	71.1	59.0	59.0	59.0	75.6	70.1
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	107.2	105.1	104.1	103.9	118.5	118.5
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	52.3	48.5	46.9	46.5	68.7	68.7
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	87.4	58.0	60.9	58.0	58.0	58.0
7TG1 - Extração de VA (t/h)	31.9	18.4	22.1	18.4	18.4	23.6
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	90.1	131.1	142.0	137.7	90.2	95.1
7TG2 - Extração de VA (t/h)	31.4	89.8	103.0	96.0	57.0	68.6
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	267.7	261.2	261.2	261.2	261.2	261.2
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	108.2	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	46.8	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	20.7	62.7	53.6	46.5	4.5	20.7
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	9.0	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	457.1	436.5	434.2	436.7	408.6	398.1
Produção Total de VS (t/h)	1207.9	1187.3	1185.0	1187.5	1166.2	1157.2
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	14974.1	14299.7	14225.0	14307.0	13385.3	13040.9
Custo EE TBG (R\$/h)	2097.2	2009.1	2009.1	2009.1	2444.0	2542.6
Custo EE AES (R\$/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Custo EE TGs (sem VS) (R\$/h)	161.4	135.4	137.2	138.6	108.0	96.0
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	189.6	113.8	45.5	91.0	91.0	45.5
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	136.4	0.0	27.3	46.4	54.6	27.3
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	399.8	276.0	276.0	276.0	276.0	276.0
Custo (R\$/h)	17958.6	16833.9	16720.1	16868.0	16358.8	16028.2
Redução de custo (%)	-	6.3%	6.9%	6.1%	8.9%	10.7%

## C4- SITUAÇÃO DE 27 DE JUNHO DE 2005

Casos de Otimização						
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Carga 7TG1 (MW)	16.5	9.0	9.0	9.0	-	8.2
Carga 7TG2 (MW)	16.7	14.6	15.2	15.5	-	16.0
Carga Turbina a gás (MW)	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0
EE importada (MW)	23.9	30.0	30.0	30.0	-	30.0
VB Alívio 1PV14 (t/h)	31.3	0.0	0.0	0.0	-	0.0
VB Alívio 6PV26 (t/h)	48.4	0.0	0.0	0.0	-	0.0
VB Alívio 11PV1 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0
VS Redutora 6PV12 (t/h)	11.4	15.0	5.0	10.0	-	5.0
VS Redutora 1PV51 (t/h)	31.4	10.0	5.0	10.0	-	5.0
VA Redutora 6PV13 (t/h)	46.1	0.0	5.0	10.0	-	5.0
VA Redutora 1PV52 (t/h)	25.5	0.0	5.0	7.0	-	5.0
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	56.5	6.2	10.0	12.0	-	10.0
VM Redutora 6PV14 (t/h)	48.5	0.0	5.8	6.4	-	5.8
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	119.1	117.2	117.2	117.2	-	117.2
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	61.4	59.0	59.0	59.0	-	59.0
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	100.8	98.9	98.2	98.2	-	98.2
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	46.0	42.4	41.3	41.3	-	41.3
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	121.1	58.0	58.0	58.0	-	58.0
7TG1 - Extração de VA (t/h)	57.4	18.4	18.4	18.4	-	22.4
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	109.1	104.3	118.4	111.1	-	118.2
7TG2 - Extração de VA (t/h)	40.5	48.2	64.0	52.6	-	60.0
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	264.2	252.8	252.8	252.8	-	252.8
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	106.3	85.8	85.8	85.8	-	85.8
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	29.1	51.4	41.1	41.1	-	41.1
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	50.0	28.3	28.3	20.7	-	28.3
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	4.7	8.8	8.8	6.0	-	8.8
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	-	0.5
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	496.9	395.8	394.3	397.0	-	394.1
Produção Total de VS (t/h)	1205.3	1104.2	1102.6	1105.4	-	1102.5
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	16277.8	12967.4	12915.7	13005.6	-	12910.8
Custo EETBG (R\$/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0
Custo EEAES (R\$/h)	1593.2	1997.7	1997.7	1997.7	-	1997.7
Custo EETGs (sem VS) (R\$/h)	199.1	141.4	145.4	147.2	-	145.4
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	194.8	113.8	45.5	91.0	-	45.5
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	195.2	0.0	27.3	46.4	-	27.3
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	669.1	39.3	100.5	117.1	-	100.5
Custo (R\$/h)	19129.1	15259.6	15232.1	15405.1	-	15227.2
Redução de custo (%)	-	20.2%	20.4%	19.5%	-	20.4%

## C5- SITUAÇÃO DE 10 DE JULHO DE 2005

Casos de Otimização						
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Carga 7TG1 (MW)	14.6	9.0	9.0	9.0	-	8.0
Carga 7TG2 (MW)	16.7	10.8	11.4	11.5	-	12.4
Carga Turbina a gás (MW)	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0
EEimportada (MW)	23.1	30.0	30.0	30.0	-	30.0
VB Alívio 1PV14 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0
VB Alívio 6PV26 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0
VB Alívio 11PV1 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0
VS Redutora 6PV12 (t/h)	40.0	15.0	5.0	10.0	-	5.0
VS Redutora 1PV51 (t/h)	0.0	10.0	5.0	10.0	-	5.0
VA Redutora 6PV13 (t/h)	47.6	0.0	5.0	10.0	-	5.0
VA Redutora 1PV52 (t/h)	0.0	0.0	5.0	7.0	-	5.0
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	51.8	74.0	69.0	69.0	-	69.0
VM Redutora 6PV14 (t/h)	44.8	0.0	5.0	5.0	-	5.0
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	121.1	115.5	115.6	115.5	-	115.6
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	70.2	62.9	63.0	62.9	-	63.0
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	100.0	112.7	117.1	114.4	-	117.1
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	49.0	70.6	78.0	73.5	-	78.0
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	108.4	58.0	58.0	58.0	-	58.0
7TG1 - Extração de VA (t/h)	52.3	18.4	18.4	18.4	-	23.6
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	117.6	127.9	136.0	131.5	-	135.8
7TG2 - Extração de VA (t/h)	52.5	99.3	107.2	100.7	-	101.9
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	269.9	263.8	263.8	263.8	-	263.8
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	111.6	96.8	96.8	96.8	-	96.8
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	46.5	66.1	66.1	66.1	-	66.1
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	57.7	67.5	49.3	46.5	-	49.3
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	3.6	8.8	8.8	8.8	-	8.8
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	-	0.5
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	476.5	422.2	419.9	422.5	-	419.7
Produção Total de VS (t/h)	1196.5	1142.3	1139.9	1142.6	-	1139.7
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	20068.4	17784.0	17684.4	17797.7	-	17676.0
Custo EE TBG (R\$/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0
Custo EE AES (R\$/h)	1212.5	1574.1	1574.1	1574.1	-	1574.1
Custo EE TGs (sem VS) (R\$/h)	235.1	148.5	153.2	153.8	-	153.2
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	234.2	146.3	58.5	117.0	-	58.5
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	167.1	0.0	35.1	59.7	-	35.1
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	791.0	605.7	605.7	605.7	-	605.7
Custo (R\$/h)	22708.3	20258.6	20110.9	20308.0	-	20102.6
Redução de custo (%)	-	10.8%	11.4%	10.6%	-	11.5%

## C6- SITUAÇÃO DE 14 DE AGOSTO DE 2005

Casos de Otimização						
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Carga 7TG1 (MW)	8.7	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga 7TG2 (MW)	9.1	13.1	13.4	13.8	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	27.9	30.0	30.0	30.0	35.5	37.1
EEimportada (MW)	8.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 1PV14 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 6PV26 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 11PV1 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VS Redutora 6PV12 (t/h)	13.3	15.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VS Redutora 1PV51 (t/h)	0.0	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 6PV13 (t/h)	17.4	0.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 1PV52 (t/h)	0.0	0.0	5.0	7.0	10.0	5.0
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	41.9	69.2	64.2	64.2	59.2	64.2
VM Redutora 6PV14 (t/h)	41.3	0.0	5.0	5.0	10.0	5.0
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	122.9	115.5	115.5	115.5	127.5	126.6
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	73.4	63.0	63.0	63.0	80.6	79.4
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	104.2	113.8	114.5	117.2	117.3	117.3
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	55.1	72.1	73.4	77.8	78.0	78.0
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	72.7	58.0	58.0	58.0	58.0	58.0
7TG1 - Extração de VA (t/h)	39.4	18.4	18.4	18.4	18.4	23.6
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	76.9	98.1	110.0	100.0	68.9	70.6
7TG2 - Extração de VA (t/h)	38.6	47.4	61.6	46.0	28.0	35.3
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	269.5	264.7	264.7	264.7	264.7	264.7
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	109.9	97.7	97.7	97.7	97.7	97.7
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	41.9	52.9	52.9	52.9	52.9	52.9
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	54.7	49.3	37.4	25.5	4.5	16.4
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	4.7	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	360.2	375.7	373.3	375.9	351.1	340.3
Produção Total de VS (t/h)	1128.4	1143.9	1141.5	1144.1	1125.2	1116.0
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	15414.8	16077.8	15976.1	16088.7	15028.7	14565.2
Custo EE TBG (R\$/h)	2102.9	2261.7	2261.7	2261.7	2679.1	2800.4
Custo EE AES (R\$/h)	1740.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Custo EETGs (sem VS) (R\$/h)	133.8	165.4	168.3	171.3	135.0	120.0
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	79.1	148.5	59.4	118.8	118.8	59.4
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	62.2	0.0	35.7	60.7	71.4	35.7
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	692.2	575.5	575.5	575.5	575.5	575.5
Custo (R\$/h)	20225.7	19228.9	19076.8	19276.7	18608.6	18156.3
Redução de custo (%)	-	4.9%	5.7%	4.7%	8.0%	10.2%

## C7- SITUAÇÃO DE 23 DE AGOSTO DE 2005

Casos de Otimização						
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Carga 7TG1 (MW)	9.6	10.3	10.7	10.6	10.6	10.5
Carga 7TG2 (MW)	10.0	11.2	13.1	12.6	9.1	9.1
Carga Turbina a gás (MW)	29.9	30.0	30.0	30.0	34.2	34.2
EE importada (MW)	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alvío 1PV14 (t/h)	19.6	34.5	30.4	29.5	42.9	30.8
VB Alvío 6PV26 (t/h)	30.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alvío 11PV1 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VS Redutora 6PV12 (t/h)	13.6	15.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VS Redutora 1PV51 (t/h)	0.0	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 6PV13 (t/h)	27.5	0.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 1PV52 (t/h)	8.5	0.0	5.0	7.0	10.4	5.0
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	10.7	0.0	10.0	12.0	20.0	10.0
VM Redutora 6PV14 (t/h)	22.0	0.0	5.3	5.0	10.0	5.6
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	122.8	115.5	115.5	115.5	115.5	115.5
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	73.1	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	104.8	95.5	95.1	95.1	95.1	95.1
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	52.2	38.2	37.6	37.6	37.6	37.6
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	55.0	58.0	58.0	58.0	58.0	58.0
7TG1 - Extração de VA (t/h)	12.9	11.4	9.5	10.0	10.1	10.5
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	67.9	73.2	80.4	78.4	65.5	65.5
7TG2 - Extração de VA (t/h)	18.9	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	271.3	270.1	270.8	270.1	270.1	270.1
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	110.0	103.1	104.1	103.1	103.1	103.1
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	28.7	52.8	29.0	29.0	29.0	29.0
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	20.7	40.2	37.0	40.2	37.0	37.0
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	4.7	0.4	3.7	0.9	0.4	3.7
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	12.6	12.6	0.5	12.6	0.5	0.5
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	362.8	364.8	357.2	364.6	347.3	337.3
Produção Total de VS (t/h)	1098.6	1100.6	1093.0	1100.4	1087.5	1077.5
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	15527.3	15613.3	15288.4	15605.7	14863.0	14434.9
Custo EETBG (R\$/h)	2254.4	2261.7	2261.7	2261.7	2580.0	2580.3
Custo EE AES (R\$/h)	1283.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Custo EETGs (sem VS) (R\$/h)	147.2	161.4	178.7	174.0	147.5	147.0
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	80.8	148.5	59.4	118.8	118.8	59.4
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	128.2	0.0	35.7	60.7	72.8	35.7
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	271.8	0.0	127.0	141.4	249.6	130.1
Custo (R\$/h)	19693.1	18184.8	17950.8	18362.4	18031.7	17387.3
Redução de custo (%)	-	7.7%	8.8%	6.8%	8.4%	11.7%

## C8- SITUAÇÃO DE 17 DE SETEMBRO DE 2005

Casos de Otimização						
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Carga 7TG1 (MW)	9.8	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga 7TG2 (MW)	10.2	13.5	13.9	14.0	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	29.7	30.0	30.0	30.0	35.7	37.7
EE importada (MW)	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 1PV14 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 6PV26 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 11PV1 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VS Redutora 6PV12 (t/h)	11.5	15.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VS Redutora 1PV51 (t/h)	0.0	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 6PV13 (t/h)	46.2	0.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 1PV52 (t/h)	0.0	0.0	5.0	7.0	10.0	7.7
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	50.8	82.2	77.2	22.2	22.2	77.2
VM Redutora 6PV14 (t/h)	54.2	0.0	5.0	60.0	60.0	5.0
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	119.9	115.8	116.7	115.5	125.6	130.9
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	76.1	63.7	65.0	63.3	78.1	85.9
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	93.2	110.3	110.3	108.6	110.3	110.3
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	44.2	73.3	73.3	70.4	73.3	73.3
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	103.0	61.1	73.4	68.7	58.0	58.0
7TG1 - Extração de VA (t/h)	74.7	22.4	38.5	32.4	18.4	23.6
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	107.3	142.0	142.0	142.0	120.8	115.7
7TG2 - Extração de VA (t/h)	74.8	104.9	102.9	102.5	98.5	96.6
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	270.3	266.0	266.0	266.0	266.0	266.0
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	110.8	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	41.7	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	38.5	39.7	27.8	25.0	4.0	4.0
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	4.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	387.0	402.0	400.3	402.7	376.5	364.7
Produção Total de VS (t/h)	1139.4	1154.5	1152.7	1155.1	1135.0	1125.2
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	17152.1	17818.0	17739.2	17847.6	16688.7	16163.0
Custo EE/TBG (R\$/h)	1965.4	1986.3	1986.3	1986.3	2362.2	2494.7
Custo EE/AES (R\$/h)	2891.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Custo EETGs (sem VS) (R\$/h)	150.2	168.8	171.7	172.3	135.0	120.0
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	71.0	153.8	61.5	123.0	123.0	61.5
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	171.0	0.0	37.0	62.9	74.0	46.9
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	903.6	708.1	708.1	708.1	708.1	708.1
Custo (R\$/h)	23304.9	20834.9	20703.8	20900.2	20091.0	19594.1
Redução de custo (%)	-	10.6%	11.2%	10.3%	13.8%	15.9%

## C9- SITUAÇÃO DE 19 DE SETEMBRO DE 2005

Casos de Otimização							
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	
Carga 7TG1 (MW)	10.5	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	
Carga 7TG2 (MW)	10.9	14.2	14.5	14.9	9.0	8.0	
Carga Turbina a gás (MW)	30.5	30.0	30.0	30.0	36.6	38.0	
EE importada (MW)	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
VB Alívio 1PV14 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
VB Alívio 6PV26 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
VB Alívio 11PV1(t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
VS Redutora 6PV12 (t/h)	13.3	15.0	5.0	10.0	10.0	5.0	
VS Redutora 1PV51 (t/h)	0.0	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0	
VA Redutora 6PV13 (t/h)	43.8	0.0	5.0	10.0	10.0	5.0	
VA Redutora 1PV52 (t/h)	0.0	0.0	5.0	7.0	10.0	5.0	
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	37.7	70.0	65.0	65.0	60.0	65.0	
VM Redutora 6PV14 (t/h)	54.7	0.0	5.0	5.0	10.0	5.0	
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	121.5	115.5	115.5	115.5	126.0	122.3	
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	75.2	63.1	63.1	63.1	78.6	73.1	
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	99.3	113.6	112.6	115.3	116.7	116.7	
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	50.1	72.8	71.2	75.7	78.0	78.0	
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	96.9	58.0	58.1	58.0	58.0	58.0	
7TG1 - Extração de VA (t/h)	63.3	18.4	18.5	18.4	18.4	23.6	
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	102.2	128.5	142.0	132.0	97.2	102.2	
7TG2 - Extração de VA (t/h)	63.4	83.2	100.1	84.5	66.5	78.1	
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	272.0	266.6	266.6	266.6	266.6	266.6	
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	114.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	28.5	52.8	52.8	52.8	52.8	52.8	
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	54.8	46.5	37.4	25.5	4.5	20.7	
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	9.0	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	12.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	385.1	386.9	384.6	387.2	357.5	347.2	
Produção Total de VS (t/h)	1138.5	1140.4	1138.1	1140.7	1117.8	1109.0	
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	17065.8	17148.0	17046.0	17162.5	15844.0	15386.0	
Custo EE TBG (R\$/h)	2017.7	1986.3	1986.3	1986.3	2420.2	2516.0	
Custo EE AES (R\$/h)	1407.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Custo EE TGs (sem VS) (R\$/h)	160.7	173.6	176.0	178.9	135.0	120.2	
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	82.0	153.8	61.5	123.0	123.0	61.5	
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	162.0	0.0	37.0	62.9	74.0	37.0	
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	795.3	603.0	603.0	603.0	603.0	603.0	
Custo (R\$/h)	21690.9	20064.7	19909.8	20116.6	19199.2	18723.6	
Redução de custo (%)	-	7.5%	8.2%	7.3%	11.5%	13.7%	

## C10- SITUAÇÃO DE 20 DE SETEMBRO DE 2005

Casos de Otimização						
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Carga 7TG1 (MW)	9.4	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga 7TG2 (MW)	9.8	11.4	11.8	12.0	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	30.0	30.0	30.0	30.0	33.7	35.7
EE importada (MW)	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 1PV14 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 6PV26 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 11PV1(t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VS Redutora 6PV12 (t/h)	12.9	15.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VS Redutora 1PV51 (t/h)	0.0	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 6PV13 (t/h)	51.6	0.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 1PV52 (t/h)	0.0	0.0	5.0	7.0	10.0	8.5
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	37.7	59.1	10.0	12.0	49.1	54.1
VM Redutora 6PV14 (t/h)	57.0	0.0	49.1	47.1	10.0	5.0
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	121.9	115.6	115.5	115.5	126.4	131.1
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	75.9	63.2	63.1	63.1	79.1	86.0
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	96.2	111.0	110.2	110.0	111.0	111.0
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	47.0	74.0	72.6	72.2	74.0	74.0
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	103.7	58.0	64.1	58.0	58.0	58.0
7TG1 - Extração de VA (t/h)	77.6	18.4	26.3	18.4	18.4	23.6
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	108.6	134.2	142.0	140.8	116.6	112.1
7TG2 - Extração de VA (t/h)	78.4	104.6	113.6	110.8	92.8	91.8
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	271.9	271.4	271.4	271.4	271.4	271.4
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	110.6	104.4	104.4	104.4	104.4	104.4
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	28.0	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	54.7	41.7	32.6	25.5	4.5	4.5
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	9.0	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	12.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	385.8	385.9	383.9	386.3	370.2	358.3
Produção Total de VS (t/h)	1139.9	1140.0	1138.0	1140.4	1128.1	1118.4
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	17099.8	17103.3	17013.0	17119.5	16405.4	15880.2
Custo EE TBG (R\$/h)	1985.4	1986.3	1986.3	1986.3	2229.6	2362.0
Custo EE AES (R\$/h)	1611.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Custo EE TGs (sem VS) (R\$/h)	144.7	153.3	155.7	157.3	135.0	120.0
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	79.4	153.8	61.5	123.0	123.0	61.5
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	190.9	0.0	37.0	62.9	74.0	49.9
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	815.6	508.9	508.9	508.9	508.9	508.9
Custo (R\$/h)	21927.4	19905.6	19762.3	19957.9	19475.9	18982.5
Redução de custo (%)	-	9.2%	9.9%	9.0%	11.2%	13.4%

## C11- SITUAÇÃO DE 3 DE OUTUBRO DE 2005

	Casos de Otimização					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Carga 7TG1 (MW)	9.4	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga 7TG2 (MW)	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	30.1	30.0	30.0	30.0	36.0	37.7
EE importada (MW)	7.7	5.0	5.3	5.4	0.0	0.0
VB Alívio 1PV14 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 6PV26 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 11PV1 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VS Redutora 6PV12 (t/h)	15.3	15.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VS Redutora 1PV51 (t/h)	31.6	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 6PV13 (t/h)	30.4	0.0	5.0	10.0	10.0	5.4
VA Redutora 1PV52 (t/h)	14.2	0.0	5.0	7.0	10.0	5.0
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	25.7	0.0	51.1	51.1	46.1	51.1
VM Redutora 6PV14 (t/h)	39.8	56.1	5.0	5.0	10.0	5.0
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	127.5	120.0	118.9	115.8	126.0	126.8
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	79.1	69.4	67.9	63.2	78.2	79.4
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	104.0	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	54.3	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	59.2	58.0	58.0	58.0	58.0	58.0
7TG1 - Extração de VA (t/h)	18.7	18.4	18.4	18.4	18.4	23.6
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	64.5	69.1	81.5	76.7	65.6	65.5
7TG2 - Extração de VA (t/h)	19.3	28.2	45.2	38.6	23.4	28.4
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	275.2	279.7	279.7	279.7	279.7	279.7
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	112.2	112.7	112.7	112.7	112.7	112.7
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	42.0	53.0	53.0	53.0	53.0	53.0
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	50.3	69.3	60.2	57.4	39.2	48.3
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	4.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	373.9	365.4	361.8	363.9	356.6	345.5
Produção Total de VS (t/h)	1152.9	1144.4	1140.9	1142.9	1142.0	1132.7
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	15983.0	15620.2	15467.7	15554.7	15244.3	14771.3
Custo EE TBG (R\$/h)	2085.6	2080.5	2080.5	2080.5	2496.4	2613.6
Custo EE AES (R\$/h)	637.4	412.0	437.6	444.4	0.0	0.0
Custo EE TGs (sem VS) (R\$/h)	138.2	135.0	135.0	135.0	135.0	120.0
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	278.6	148.5	59.4	118.8	118.8	59.4
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	158.7	0.0	35.6	60.5	71.2	36.9
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	544.1	466.5	466.5	466.5	466.5	466.5
Custo (R\$/h)	19825.5	18862.7	18682.3	18860.4	18532.1	18067.7
Redução de custo (%)	-	4.9%	5.8%	4.9%	6.5%	8.9%

## C12- SITUAÇÃO DE 9 DE FEVEREIRO DE 2006

Casos de Otimização						
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Carga 7TG1 (MW)	9.8	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga 7TG2 (MW)	9.8	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	30.3	30.0	30.0	30.0	37.7	38.0
EE importada (MW)	8.8	7.0	7.0	7.7	0.0	1.0
VB Alívio 1PV14 (t/h)	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 6PV26 (t/h)	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 11PV1(t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VS Redutora 6PV12 (t/h)	14.8	15.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VS Redutora 1PV51 (t/h)	32.8	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 6PV13 (t/h)	7.1	0.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 1PV52 (t/h)	5.5	0.0	5.0	7.0	10.0	5.0
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	39.0	56.6	10.0	12.0	20.0	10.0
VM Redutora 6PV14 (t/h)	39.4	0.0	46.6	54.2	46.2	46.6
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	117.6	115.5	115.5	115.5	115.5	115.5
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	71.8	63.4	63.4	63.4	63.4	63.4
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	101.4	99.1	92.7	94.0	92.1	92.7
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	54.9	48.4	37.8	39.9	36.7	37.8
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	63.4	58.0	59.7	58.0	58.0	58.0
7TG1 - Extração de VA (t/h)	23.1	18.4	20.6	18.4	18.4	23.6
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	70.3	119.7	137.3	128.6	130.8	131.4
7TG2 - Extração de VA (t/h)	23.4	97.2	121.0	109.2	112.2	118.0
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	278.8	247.5	247.5	247.5	247.5	247.5
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	50.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	29.6	52.6	52.6	42.3	42.3	52.6
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	20.7	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	5.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	359.8	345.7	343.5	344.4	336.6	327.5
Produção Total de VS (t/h)	1141.7	1127.6	1125.4	1126.3	1126.6	1117.8
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	16054.7	15424.2	15328.0	15368.6	15020.9	14612.1
Custo EETBG (R\$/h)	1888.6	1867.8	1867.8	1867.8	2346.3	2365.9
Custo EEAES (R\$/h)	400.8	318.5	318.5	348.9	0.0	46.1
Custo EETGs (sem VS) (R\$/h)	147.1	135.0	135.0	135.0	135.0	120.0
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	295.3	155.0	62.0	124.0	124.0	62.0
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	47.0	0.0	37.1	63.1	74.2	37.1
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	680.4	491.7	491.7	575.0	575.0	491.7
Custo (R\$/h)	19513.9	18392.2	18240.1	18482.5	18275.5	17734.9
Redução de custo (%)	-	5.7%	6.5%	5.3%	6.3%	9.1%

## C13- SITUAÇÃO DE 21 DE FEVEREIRO DE 2006

Casos de Otimização						
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Carga 7TG1 (MW)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Carga 7TG2 (MW)	9.4	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	30.2	30.0	30.0	30.0	38.0	38.0
EE importada (MW)	16.9	12.6	12.0	12.5	4.7	5.0
VB Alívio 1PV14 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 6PV26 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 11PV1(t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VS Redutora 6PV12 (t/h)	39.2	15.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VS Redutora 1PV51 (t/h)	0.0	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 6PV13 (t/h)	73.8	0.9	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 1PV52 (t/h)	0.0	0.0	7.3	8.1	12.4	7.3
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	51.0	81.4	23.1	23.1	23.1	23.1
VM Redutora 6PV14 (t/h)	48.8	0.0	60.0	60.0	60.0	60.0
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	123.7	134.5	131.1	131.1	131.1	131.1
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	75.8	86.0	86.0	86.0	86.0	86.0
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	102.6	118.5	117.2	117.2	117.2	117.2
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	53.1	74.3	78.0	78.0	78.0	78.0
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7TG1 - Extração de VA (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	146.5	137.3	137.3	137.3	137.3	133.6
7TG2 - Extração de VA (t/h)	130.3	121.0	121.0	121.0	121.0	121.0
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	268.5	254.1	279.7	268.6	268.3	279.7
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	48.3	38.7	87.4	66.4	65.8	87.4
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	30.1	53.2	53.6	53.6	53.6	53.6
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	47.1	67.5	83.7	67.5	62.7	83.7
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	6.9	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	363.1	356.5	357.9	356.8	348.1	345.8
Produção Total de VS (t/h)	1177.1	1170.5	1171.9	1170.8	1170.5	1168.2
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	16202.3	15904.8	15969.6	15920.3	15532.6	15430.1
Custo EETBG (R\$/h)	1880.2	1867.8	1867.8	1867.8	2365.9	2365.9
Custo EE AES (R\$/h)	768.2	571.5	543.9	567.9	212.6	226.1
Custo EETGs (sem VS) (R\$/h)	70.3	67.5	67.5	67.5	67.5	60.0
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	242.8	155.0	62.0	124.0	124.0	62.0
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	273.8	3.3	45.5	67.1	83.1	45.5
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	866.1	706.6	721.0	721.0	721.0	721.0
Custo (R\$/h)	20303.6	19276.5	19277.4	19335.6	19106.7	18910.7
Redução de custo (%)	-	5.1%	5.1%	4.8%	5.9%	6.9%

## C14- SITUAÇÃO DE 23 DE FEVEREIRO DE 2006

Casos de Otimização						
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Carga 7TG1 (MW)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Carga 7TG2 (MW)	9.1	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	29.5	30.0	30.0	30.0	38.0	38.0
EE importada (MW)	17.4	12.9	12.9	13.5	5.6	5.9
VB Alívio 1PV14 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 6PV26 (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VB Alívio 11PV1(t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VS Redutora 6PV12 (t/h)	14.9	15.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VS Redutora 1PV51 (t/h)	30.9	10.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 6PV13 (t/h)	24.8	0.0	5.0	10.0	10.0	5.0
VA Redutora 1PV52 (t/h)	15.7	0.0	7.2	8.0	12.3	7.2
VM Redutora 1PV13 + 11PV4 (t/h)	43.5	80.2	20.2	20.2	20.2	20.2
VM Redutora 6PV14 (t/h)	40.6	0.0	60.0	60.0	60.0	60.0
4TBC1 - Alimentação VS (t/h)	129.7	135.7	136.0	136.0	136.0	136.0
4TBC1 - Extração de VM (t/h)	75.1	81.7	82.1	82.1	82.1	82.1
4TBC21 - Alimentação VS (t/h)	112.4	118.5	118.5	118.5	118.5	118.5
4TBC21 - Extração de VM (t/h)	58.4	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5
7TG1 - Alimentação de VS (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7TG1 - Extração de VA (t/h)	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7TG2 - Alimentação de VS (t/h)	122.8	137.3	137.3	137.3	137.3	133.6
7TG2 - Extração de VA (t/h)	101.7	121.0	121.0	121.0	121.0	121.0
22TBC1 - Alimentação de VS (t/h)	287.9	288.5	303.4	292.2	292.0	303.4
22TBC1 - Extração de VA (t/h)	48.1	67.2	95.5	74.4	73.9	95.5
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	43.6	53.4	53.4	53.4	53.4	53.4
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	25.5	62.7	62.7	46.5	41.7	62.7
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	6.9	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Produção Caldeiras Utilidades (t/h)	406.8	413.2	413.4	412.2	403.6	401.3
Produção Total de VS (t/h)	1185.5	1191.9	1192.1	1191.0	1190.7	1188.4
Custo VS Caldeiras (R\$/h)	18149.8	18435.9	18443.9	18394.5	18006.9	17904.3
Custo EETBG (R\$/h)	1837.4	1867.8	1867.8	1867.8	2365.9	2365.9
Custo EE AES (R\$/h)	788.4	586.7	586.7	610.7	255.4	268.9
Custo EETGs (sem VS) (R\$/h)	68.0	67.5	67.5	67.5	67.5	60.0
Custo Redutora VS/VA (R\$/h)	283.8	155.0	62.0	124.0	124.0	62.0
Custo Redutora VA/VM (R\$/h)	150.5	0.0	45.2	66.7	82.7	45.2
Custo Redutora VM/VB (R\$/h)	729.7	695.8	695.8	695.8	695.8	695.8
Custo (R\$/h)	22007.5	21808.7	21768.9	21827.0	21598.2	21402.2
Redução de custo (%)	-	0.9%	1.1%	0.8%	1.9%	2.8%

## APÊNDICE D: COMPARATIVO DE RESULTADOS PARA SELEÇÃO DE SOLVER

### D1- SITUAÇÃO DE 7 DE MAIO DE 2005

Solver	COINSBB					OSL					CPLEX					XPRESS					BDMLP				
	Caso	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4
Produção Total de VS (t/h)	1138.7	1134.3	<b>1137.6</b>	1113.5	1106.9	1138.7	1134.3	1136.9	1113.5	1106.9	1138.7	1134.3	1136.9	1113.5	1106.9	1138.7	1134.3	1136.9	1113.5	1106.9	1138.7	1134.3	1136.9	1113.5	1106.9
Total vapor para turbinas VMVB cambiáveis (t/h)	0.9	3.7	<b>8.8</b>	8.8	6.0	0.9	3.7	0.9	8.8	6.0	0.9	3.7	0.9	8.8	6.0	0.9	3.7	0.9	8.8	6.0	0.9	3.7	0.9	8.8	6.0
Total vapor para turbinas VAVM cambiáveis (t/h)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Carga 7TG1 (MW)	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga 7TG2 (MW)	15.3	14.2	<b>15.0</b>	9.0	8.0	15.3	14.2	14.2	9.0	8.0	15.3	14.2	14.2	9.0	8.0	15.3	14.2	14.2	9.0	8.0	15.3	14.2	14.2	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	30.0	30.0	30.0	37.0	37.4	30.0	30.0	30.0	37.0	37.4	30.0	30.0	30.0	37.0	37.4	30.0	30.0	30.0	37.0	37.4	30.0	30.0	30.0	37.0	37.4
EE importada (MW)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	56.9	70.3	<b>56.9</b>	43.4	67.2	56.9	70.3	70.3	43.4	67.2	56.9	70.3	70.3	43.4	67.2	56.9	70.3	70.3	43.4	67.2	56.9	70.3	70.3	43.4	67.2
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Número de iterações	0.0	46.0	39.0	0.0	20.0	66.0	121.0	174.0	1407.0	1858.0	12.0	30.0	13.0	10.0	14.0	28.0	76.0	30.0	24.0	35.0	314.0	919.0	456.0	919.0	2163.0
Tempo de processamento (s)	0.030	0.130	0.150	0.020	0.090	0.020	0.160	0.240	0.620	0.921	0.811	0.130	0.040	0.090	0.030	0.731	0.190	0.110	0.120	0.110	0.555	1.270	1.070	1.804	4.863
Custo (R\$/h)	15089.5	14765.8	<b>14993.4</b>	14481.1	14063.7	15089.5	14765.8	14931.8	14481.1	14063.7	15089.5	14765.8	14931.8	14481.1	14063.7	15089.5	14765.8	14931.8	14481.1	14063.7	15089.5	14765.8	14931.8	14481.1	14063.7

## D2- SITUAÇÃO DE 6 DE JUNHO DE 2005

Solver	COINSBB					OSL					CPLEX					XPRESS					BDMLP				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Produção Total de VS (t/h)	<b>1166.9</b>	<b>1165.7</b>	<b>1168.7</b>	1166.2	1157.2	1187.9	1185.0	1187.5	1166.2	1157.2	1187.9	1185.0	1187.5	1166.2	1157.2	1187.9	1185.0	1187.5	1166.2	1157.2	1187.9	1185.0	1187.5	1166.2	1157.2
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	<b>20.7</b>	<b>37.4</b>	<b>46.5</b>	4.5	20.7	41.7	53.6	46.5	4.5	20.7	41.7	53.6	46.5	4.5	20.7	41.7	53.6	46.5	4.5	20.7	41.7	53.6	46.5	4.5	20.7
Carga 7TG1 (MW)	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga 7TG2 (MW)	<b>9.0</b>	<b>9.0</b>	<b>9.0</b>	9.0	8.0	14.3	13.9	14.1	9.0	8.0	14.3	13.9	14.1	9.0	8.0	14.3	13.9	14.1	9.0	8.0	14.3	13.9	14.1	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	30.0	30.0	30.0	36.5	38.0	30.0	30.0	30.0	36.5	38.0	30.0	30.0	30.0	36.5	38.0	30.0	30.0	30.0	36.5	38.0	30.0	30.0	30.0	36.5	38.0
EE importada (MW)	<b>6.0</b>	<b>5.4</b>	<b>5.1</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	67.9	67.9	<b>67.9</b>	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Número de iterações	13.0	11.0	18.0	0.0	0.0	210.0	333.0	171.0	51.0	85.0	18.0	13.0	9.0	8.0	11.0	32.0	38.0	32.0	15.0	26.0	570.0	739.0	443.0	116.0	213.0
Tempo de processamento (s)	0.090	0.080	0.100	0.010	0.030	0.200	0.210	0.100	0.060	0.040	0.030	0.050	0.070	0.100	0.060	0.160	0.070	0.160	0.070	0.140	0.812	1.000	0.558	0.012	0.089
Custo (R\$/h)	<b>17750.9</b>	<b>17601.5</b>	<b>17744.8</b>	<b>16358.9</b>	<b>16028.3</b>	16889.3	16720.2	16868.0	16358.8	16028.2	16889.3	16720.2	16868.0	16358.8	16028.2	16889.3	16720.2	16868.0	16358.8	16028.2	16889.3	16720.2	16868.0	16358.8	16028.2

### D3- SITUAÇÃO DE 10 DE JULHO DE 2005

Solver	COINSBB					OSL					CPLEX					XPRESS					BDMLP				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Produção Total de VS (t/h)	1142.9	<b>1140.0</b>	1142.6	-	<b>1139.8</b>	1142.9	1139.9	1142.6	-	1139.7	1142.9	1139.9	1142.6	-	1139.7	1142.9	1139.9	1142.6	-	1139.7	1142.9	1139.9	1142.6	-	1139.7
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	8.8	8.8	8.8	-	8.8	8.8	8.8	8.8	-	8.8	8.8	8.8	8.8	-	8.8	8.8	8.8	8.8	-	8.8	8.8	8.8	8.8	-	8.8
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	46.5	<b>58.4</b>	46.5	-	<b>58.4</b>	46.5	49.3	46.5	-	49.3	46.5	49.3	46.5	-	49.3	46.5	49.3	46.5	-	49.3	46.5	49.3	46.5	-	49.3
Carga 7TG1 (MW)	9.0	9.0	9.0	-	8.0	9.0	9.0	9.0	-	8.0	9.0	9.0	9.0	-	8.0	9.0	9.0	9.0	-	8.0	9.0	9.0	9.0	-	8.0
Carga 7TG2 (MW)	11.5	<b>11.1</b>	11.5	-	<b>12.1</b>	11.5	11.4	11.5	-	12.4	11.5	11.4	11.5	-	12.4	11.5	11.4	11.5	-	12.4	11.5	11.4	11.5	-	12.4
Carga Turbina a gás (MW)	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0
EE importada (MW)	30.0	30.0	30.0	-	30.0	30.0	30.0	30.0	-	30.0	30.0	30.0	30.0	-	30.0	30.0	30.0	30.0	-	30.0	30.0	30.0	30.0	-	30.0
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	66.1	66.1	66.1	-	66.1	66.1	66.1	66.1	-	66.1	66.1	66.1	66.1	-	66.1	66.1	66.1	66.1	-	66.1	66.1	66.1	66.1	-	66.1
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	-	0.5	0.5	0.5	0.5	-	0.5	0.5	0.5	0.5	-	0.5	0.5	0.5	0.5	-	0.5	0.5	0.5	0.5	-	0.5
Número de iterações	0.0	6.0	0.0	-	0.0	122.0	242.0	79.0	-	242.0	9.0	11.0	8.0	-	11.0	23.0	31.0	16.0	-	31.0	755.0	1083.0	161.0	-	1078.0
Tempo de processamento (s)	0.060	0.080	0.040	-	0.070	0.090	0.220	0.070	-	0.160	0.040	0.090	0.120	-	0.070	0.130	0.120	0.070	-	0.150	0.988	1.336	0.078	-	1.207
Custo (R\$/h)	20330.5	20110.9	20308.0	-	<b>20102.9</b>	20330.5	20110.9	20308.0	-	20102.6	20330.5	20110.9	20308.0	-	20102.6	20330.5	20110.9	20308.0	-	20102.6	20330.5	20110.9	20308.0	-	20102.6

## D4- SITUAÇÃO DE 23 DE AGOSTO DE 2005

Solver	COINSBB					OSL					CPLEX					XPRESS					BDMLP				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Produção Total de VS (t/h)	1101.2	1091.1	<b>1099.2</b>	1087.5	<b>1091.1</b>	1101.2	1091.1	1099.1	1087.5	1077.5	1101.2	1091.1	1099.1	1087.5	1077.5	1101.2	1091.1	1099.1	1087.5	1077.5	1101.2	1091.1	1099.1	1087.5	1077.5
Total vapor para turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	0.4	3.7	<b>0.9</b>	0.4	3.7	0.4	3.7	0.4	0.4	3.7	0.4	3.7	0.4	0.4	3.7	0.4	3.7	0.4	0.4	3.7	0.4	3.7	0.4	0.4	3.7
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	37.0	37.0	28.3	37.0	37.0	37.0	37.0	28.3	37.0	37.0	37.0	37.0	28.3	37.0	37.0	37.0	37.0	28.3	37.0	37.0	37.0	37.0	28.3	37.0	37.0
Carga 7TG1 (MW)	10.6	10.7	<b>10.4</b>	10.6	<b>10.7</b>	10.6	10.7	10.6	10.6	10.5	10.6	10.7	10.6	10.6	10.5	10.6	10.7	10.6	10.6	10.5	10.6	10.7	10.6	10.6	10.5
Carga 7TG2 (MW)	12.7	12.6	<b>12.2</b>	9.1	<b>12.6</b>	12.7	12.6	11.9	9.1	9.1	12.7	12.6	11.9	9.1	9.1	12.7	12.6	11.9	9.1	9.1	12.7	12.6	11.9	9.1	9.1
Carga Turbina a gás (MW)	30.0	30.0	30.0	33.7	<b>30.0</b>	30.0	30.0	30.0	33.7	33.7	30.0	30.0	30.0	33.7	33.7	30.0	30.0	30.0	33.7	33.7	30.0	30.0	30.0	33.7	33.7
EE importada (MW)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	29.0	29.0	42.5	29.0	29.0	29.0	29.0	42.5	29.0	29.0	29.0	29.0	42.5	29.0	29.0	29.0	29.0	42.5	29.0	29.0	29.0	29.0	42.5	29.0	29.0
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Número de iterações	0.0	290.0	44.0	7.0	61.0	145.0	3948.0	249.0	135.0	4408.0	18.0	43.0	41.0	21.0	49.0	29.0	268.0	111.0	37.0	149.0	450.0	4488.0	820.0	1321.0	5179.0
Tempo de processamento (s)	0.050	0.500	0.140	0.090	0.270	0.190	1.492	0.150	0.100	1.371	0.060	0.090	0.130	0.080	0.150	0.120	0.180	0.150	0.160	0.120	0.359	5.359	1.621	0.938	4.664
Custo (R\$/h)	18512.6	17864.6	<b>18303.2</b>	18015.8	17371.4	18512.6	17864.6	18301.6	18015.8	17371.4	18512.6	17864.6	18301.6	18015.8	17371.4	18512.6	17864.6	18301.6	18015.8	17371.4	18512.6	17864.6	18301.6	18015.8	17371.4

## D5- SITUAÇÃO DE 17 DE SETEMBRO DE 2005

Solver	COINSBB					OSL					CPLEX					XPRESS					BDMLP				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Produção Total de VS (t/h)	1155.4	1152.7	1155.1	1135.0	1125.2	1155.4	1152.7	1155.1	1135.0	1125.2	1155.4	1152.7	1155.1	1135.0	1125.2	1155.4	1152.7	1155.1	1135.0	1125.2	1155.4	1152.7	1155.1	1135.0	1125.2
Total vapor para turbinas VMVB cambiáveis (t/h)	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
Total vapor para turbinas VAVM cambiáveis (t/h)	15.9	27.8	25.0	4.0	4.0	15.9	27.8	25.0	4.0	4.0	15.9	27.8	25.0	4.0	4.0	15.9	27.8	25.0	4.0	4.0	15.9	27.8	25.0	4.0	4.0
Carga 7TG1 (MW)	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga 7TG2 (MW)	14.3	13.9	14.0	9.0	8.0	14.3	13.9	14.0	9.0	8.0	14.3	13.9	14.0	9.0	8.0	14.3	13.9	14.0	9.0	8.0	14.3	13.9	14.0	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	30.0	30.0	30.0	35.7	37.7	30.0	30.0	30.0	35.7	37.7	30.0	30.0	30.0	35.7	37.7	30.0	30.0	30.0	35.7	37.7	30.0	30.0	30.0	35.7	37.7
EE importada (MW)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total vapor para turbinas VAVB cambiáveis (t/h)	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Número de iterações	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	57.0	93.0	59.0	40.0	50.0	9.0	10.0	9.0	9.0	8.0	25.0	22.0	23.0	13.0	16.0	229.0	323.0	215.0	113.0	175.0
Tempo de processamento (s)	0.040	0.050	0.020	0.020	0.060	0.120	0.090	0.040	0.100	0.090	0.11	0.07	0.13	0.07	0.06	0.080	0.140	0.080	0.090	0.120	0.090	0.273	0.101	0.012	0.070
Custo (R\$/h)	20924.2	20703.8	20900.2	20091.0	19594.1	20924.2	20703.8	20900.2	20091.0	19594.1	20924.2	20703.8	20900.2	20091.0	19594.1	20924.2	20703.8	20900.2	20091.0	19594.1	20924.2	20703.8	20900.2	20091.0	19594.1

## D6- SITUAÇÃO DE 9 DE FEVEREIRO DE 2006

Solver	COINSBB					OSL					CPLEX					XPRESS					BDMLP				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Produção Total de VS (t/h)	1126.6	1125.4	1126.3	1126.6	1117.8	1126.6	1125.4	1126.3	1126.6	1117.8	1126.6	1125.4	1126.3	1126.6	1117.8	1126.6	1125.4	1126.3	1126.6	1117.8	1126.6	1125.4	1126.3	1126.6	1117.8
Total vapor para turbinas VMVB cambiáveis (t/h)	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Total vapor para turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Carga 7TG1 (MW)	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga 7TG2 (MW)	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0
Carga Turbina a gás (MW)	30.0	30.0	30.0	37.7	38.0	30.0	30.0	30.0	37.7	38.0	30.0	30.0	30.0	37.7	38.0	30.0	30.0	30.0	37.7	38.0	30.0	30.0	30.0	37.7	38.0
EE importada (MW)	7.7	7.0	7.7	0.0	1.0	7.7	7.0	7.7	0.0	1.0	7.7	7.0	7.7	0.0	1.0	7.7	7.0	7.7	0.0	1.0	7.7	7.0	7.7	0.0	1.0
Total vapor para turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	42.3	52.6	42.3	42.3	52.6	42.3	52.6	42.3	42.3	52.6	42.3	52.6	42.3	42.3	52.6	42.3	52.6	42.3	42.3	52.6	42.3	52.6	42.3	42.3	52.6
Vapor para 74TBB1 B (t/h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Número de iterações	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	52.0	45.0	343.0	57.0	43.0	10.0	10.0	10.0	9.0	9.0	27.0	20.0	26.0	26.0	22.0	115.0	114.0	130.0	99.0	117.0
Tempo de processamento (s)	0.040	0.020	0.060	0.040	0.110	0.110	0.090	0.190	0.070	0.090	0.060	0.090	0.070	0.100	0.080	0.11	0.07	0.15	0.14	0.13	0.015	0.020	0.063	0.023	0.027
Custo (R\$/h)	18506.3	18240.1	18482.5	18275.5	17734.9	18506.3	18240.1	18482.5	18275.5	17734.9	18506.3	18240.1	18482.5	18275.5	17734.9	18506.3	18240.1	18482.5	18275.5	17734.9	18506.3	18240.1	18482.5	18275.5	17734.9

## APÊNDICE E: RESULTADOS DOS CINCO CASOS DE OTIMIZAÇÃO (SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS)

### E1- SITUAÇÃO DE 7 DE MAIO DE 2005

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	1	0	0	1	1
6MB4B	1	0	1	1	0	0
8MB51A	1	0	1	1	0	0
8TBB51B	1	1	0	0	1	1
88MB2A	1	0	0	1	0	1
88TBB2B	0	1	1	0	1	0
6MVT1	0	0	0	0	0	0
6TBT1	0	0	0	0	0	0
6MVT2A	1	1	1	1	1	1
6TBT2A	0	0	0	0	0	0
6MVT3A	1	1	1	1	1	1
6TBT3A	0	0	0	0	0	0
6MVT3B	1	1	1	1	1	1
6TBT3B	0	0	0	0	0	0
6MVT4A	1	1	1	1	1	1
6TBT4A	0	0	0	0	0	0
6MVT4B	1	1	1	1	1	1
6TBT4B	0	0	0	0	0	0
6MVT5A	1	1	1	1	1	1
6TBT5A	0	0	0	0	0	0
6MVT5B	1	1	1	1	1	1
6TBT5B	0	0	0	0	0	0
1TBB6A	1	0	0	0	0	0
1MB6B	1	1	1	1	1	1
1MB6C	0	1	1	1	1	1
6MB1A	1	1	1	1	1	1
6TBB1B	0	1	1	1	0	0
6MB1C	1	1	1	1	1	1
6TBB1D	1	1	1	1	0	1
6TBB1E	0	1	1	1	1	1
6MB1F	1	1	1	0	1	1
66MB1G	1	0	0	1	1	1
66MB1H	1	0	0	0	1	0
9MC1A	0	1	1	1	1	0
9MC1B	0	0	1	1	1	1
9TBC1C	0	1	0	0	0	1
99MC2A	1	0	0	0	0	0
99MC2B	1	0	0	0	0	0
88TBB1A	1	1	1	1	1	1
88TBB1B	1	1	1	1	1	1
88MB1C	1	1	1	1	1	1
88MB1D	1	1	1	1	1	1
88MB1E	1	1	1	1	1	1
88MB1F	0	0	0	0	0	0
88MB1G	0	0	0	0	0	0
74B1A	1	1	1	1	1	1
74B1B	0	0	0	0	0	0
74B1C	0	0	0	0	0	0
8MB51C	0	1	1	1	1	1
zCONC	1	1	1	1	1	1

## E2- SITUAÇÃO DE 29 DE MAIO DE 2005

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	1	1	1	1	1
6MB4B	1	0	0	0	0	0
8MB51A	1	1	0	0	0	0
8TBB51B	0	1	1	1	1	1
88MB2A	1	0	0	0	0	0
88TBB2B	0	1	1	1	1	1
6MVT1	0	0	0	0	0	0
6TBVT1	0	0	0	0	0	0
6MVT2A	0	1	1	1	1	1
6TBVT2A	1	0	0	0	0	0
6MVT3A	1	1	1	1	1	1
6TBVT3A	0	0	0	0	0	0
6MVT3B	1	1	0	1	1	1
6TBVT3B	0	0	1	0	0	0
6MVT4A	1	0	1	1	1	1
6TBVT4A	0	1	0	0	0	0
6MVT4B	1	1	1	1	1	1
6TBVT4B	0	0	0	0	0	0
6MVT5A	1	1	1	1	1	1
6TBVT5A	0	0	0	0	0	0
6MVT5B	1	1	1	1	1	1
6TBVT5B	0	0	0	0	0	0
1TBB6A	1	0	0	0	0	0
1MB6B	1	1	1	1	1	1
1MB6C	0	1	1	1	1	1
6MB1A	1	1	1	1	1	1
6TBB1B	0	1	1	1	1	1
6MB1C	1	1	1	1	1	1
6TBB1D	1	1	1	1	1	1
6TBB1E	0	0	0	0	0	0
6MB1F	1	1	1	1	1	1
66MB1G	1	1	1	1	1	1
66MB1H	1	0	0	0	0	0
9MC1A	1	1	1	1	1	1
9MC1B	0	1	1	1	1	1
9TBC1C	0	1	1	1	1	1
99MC2A	1	0	0	0	0	0
99MC2B	1	0	0	0	0	0
88TBB1A	1	1	1	1	1	1
88TBB1B	0	0	0	0	0	0
88MB1C	1	1	1	1	1	1
88MB1D	1	1	1	1	1	1
88MB1E	1	1	1	1	1	1
88MB1F	1	1	1	1	1	1
88MB1G	0	0	0	0	0	0
74B1A	0	0	1	1	1	1
74B1B	1	1	0	0	0	0
74B1C	0	0	0	0	0	0
8MB51C	1	0	1	1	1	1
zCONC	1	1	1	1	1	1

### E3- SITUAÇÃO DE 6 DE JUNHO DE 2005

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	1	1	1	1	1
6MB4B	1	0	0	0	0	0
8MB51A	1	0	1	0	0	1
8TBB51B	0	1	1	1	1	1
88MB2A	1	0	0	0	0	0
88TBB2B	0	1	1	1	1	1
6MVT1	0	0	0	0	0	0
6TBVT1	0	0	0	0	0	0
6MVT2A	1	1	0	1	1	1
6TBVT2A	0	0	1	0	0	0
6MVT3A	1	1	1	1	1	1
6TBVT3A	0	0	0	0	0	0
6MVT3B	1	1	1	1	1	1
6TBVT3B	0	0	0	0	0	0
6MVT4A	1	1	0	1	1	1
6TBVT4A	0	0	1	0	0	0
6MVT4B	1	0	1	0	1	1
6TBVT4B	0	1	0	1	0	0
6MVT5A	1	0	1	1	1	1
6TBVT5A	0	1	0	0	0	0
6MVT5B	1	1	1	0	1	1
6TBVT5B	0	0	0	1	0	0
1TBB6A	1	1	1	0	0	1
1MB6B	1	1	1	1	1	1
1MB6C	0	0	0	1	1	0
6MB1A	1	1	1	1	0	0
6TBB1B	0	1	1	1	1	1
6MB1C	1	1	1	1	1	1
6TBB1D	1	1	1	1	1	1
6TBB1E	0	0	0	0	0	0
6MB1F	1	1	1	1	1	1
66MB1G	1	1	1	1	1	1
66MB1H	1	0	0	0	1	1
9MC1A	0	0	1	1	0	0
9MC1B	0	1	0	0	1	1
9TBC1C	0	1	1	1	1	1
99MC2A	1	0	0	0	0	0
99MC2B	1	0	0	0	0	0
88TBB1A	1	1	1	1	1	1
88TBB1B	1	1	1	1	1	1
88MB1C	1	1	1	1	0	0
88MB1D	1	1	1	1	1	1
88MB1E	1	1	1	1	1	1
88MB1F	0	0	0	0	1	1
88MB1G	0	0	0	0	0	0
74B1A	1	0	1	0	1	0
74B1B	0	1	0	1	0	1
74B1C	0	0	0	0	0	0
8MB51C	1	1	0	1	1	0
zCONC	1	0	0	0	0	0

### E4- SITUAÇÃO DE 27 DE JUNHO DE 2005

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	1	1	1	0	1
6MB4B	1	0	0	0	0	0
8MB51A	0	1	0	0	0	0
8TBB51B	1	1	1	1	0	1
88MB2A	1	0	0	1	0	0
88TBB2B	0	1	1	0	0	1
6MVT1	1	1	1	1	0	1
6TBVT1	0	0	0	0	0	0
6MVT2A	0	1	0	1	0	1
6TBVT2A	1	0	1	0	0	0
6MVT3A	0	0	1	1	0	0
6TBVT3A	1	1	0	0	0	1
6MVT3B	1	0	0	1	0	0
6TBVT3B	0	1	1	0	0	1
6MVT4A	1	1	1	1	0	1
6TBVT4A	0	0	0	0	0	0
6MVT4B	0	1	1	1	0	1
6TBVT4B	1	0	0	0	0	0
6MVT5A	1	1	1	1	0	1
6TBVT5A	0	0	0	0	0	0
6MVT5B	1	1	1	1	0	1
6TBVT5B	0	0	0	0	0	0
1TBB6A	0	0	0	1	0	0
1MB6B	1	1	1	0	0	1
1MB6C	1	1	1	1	0	1
6MB1A	1	1	1	1	0	1
6TBB1B	1	1	1	1	0	1
6MB1C	1	1	1	1	0	1
6TBB1D	0	1	1	1	0	1
6TBB1E	0	0	0	0	0	0
6MB1F	1	1	1	1	0	1
66MB1G	1	1	1	1	0	1
66MB1H	1	0	0	0	0	0
9MC1A	0	0	0	0	0	1
9MC1B	1	0	0	0	0	0
9TBC1C	0	1	0	0	0	0
99MC2A	0	0	0	0	0	0
99MC2B	0	0	1	1	0	0
88TBB1A	1	1	1	1	0	1
88TBB1B	0	0	0	0	0	0
88MB1C	1	1	1	1	0	1
88MB1D	1	1	1	1	0	1
88MB1E	1	1	1	1	0	1
88MB1F	0	1	1	1	0	1
88MB1G	1	0	0	0	0	0
74B1A	1	1	1	1	0	1
74B1B	0	0	0	0	0	0
74B1C	0	0	0	0	0	0
8MB51C	1	0	1	1	0	1
zCONC	1	1	1	1	0	1

## E5- SITUAÇÃO DE 10 DE JULHO DE 2005

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	1	1	1	0	1
6MB4B	1	0	0	0	0	0
8MB51A	1	1	1	0	0	1
8TBB51B	0	1	1	1	0	1
88MB2A	1	0	0	0	0	0
88TBB2B	0	1	1	1	0	1
6MVT1	1	1	1	1	0	1
6TBVT1	0	0	0	0	0	0
6MVT2A	0	1	0	1	0	0
6TBVT2A	1	0	1	0	0	1
6MVT3A	0	1	0	1	0	0
6TBVT3A	1	0	1	0	0	1
6MVT3B	0	1	1	1	0	1
6TBVT3B	1	0	0	0	0	0
6MVT4A	1	0	1	0	0	1
6TBVT4A	0	1	0	1	0	0
6MVT4B	1	0	1	0	0	1
6TBVT4B	0	1	0	1	0	0
6MVT5A	1	0	1	1	0	1
6TBVT5A	0	1	0	0	0	0
6MVT5B	1	1	0	1	0	0
6TBVT5B	0	0	1	0	0	1
1TBB6A	1	0	0	0	0	0
1MB6B	1	1	1	1	0	1
1MB6C	0	1	1	1	0	1
6MB1A	1	1	1	1	0	1
6TBB1B	1	1	1	1	0	1
6MB1C	1	1	1	1	0	1
6TBB1D	0	1	1	1	0	1
6TBB1E	0	0	0	0	0	0
6MB1F	1	1	1	1	0	1
66MB1G	1	1	1	1	0	1
66MB1H	1	0	0	0	0	0
9MC1A	0	0	1	0	0	1
9MC1B	0	1	0	1	0	0
9TBC1C	0	1	1	1	0	1
99MC2A	1	0	0	0	0	0
99MC2B	1	0	0	0	0	0
88TBB1A	1	1	1	1	0	1
88TBB1B	1	1	1	1	0	1
88MB1C	1	1	1	1	0	1
88MB1D	1	1	1	1	0	1
88MB1E	1	1	1	1	0	1
88MB1F	0	0	0	0	0	0
88MB1G	0	0	0	0	0	0
74B1A	0	0	0	0	0	0
74B1B	0	0	0	0	0	0
74B1C	0	0	0	0	0	0
8MB51C	1	0	0	1	0	0
zCONC	1	1	1	1	0	1

## E6- SITUAÇÃO DE 14 DE AGOSTO DE 2005

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	0	1	1	1	1
6MB4B	1	1	0	0	0	0
8MB51A	1	1	1	1	1	1
8TBB51B	1	0	1	1	1	1
88MB2A	1	1	0	0	0	0
88TBB2B	0	1	1	1	1	1
6MVT1	1	0	1	1	1	1
6TBVT1	0	0	0	0	0	0
6MVT2A	0	1	0	1	1	1
6TBVT2A	1	0	1	0	0	0
6MVT3A	1	1	1	1	1	0
6TBVT3A	0	1	0	0	0	1
6MVT3B	1	0	1	1	1	1
6TBVT3B	0	0	0	0	0	0
6MVT4A	0	1	0	0	1	1
6TBVT4A	1	0	1	1	0	0
6MVT4B	0	0	0	0	0	0
6TBVT4B	0	0	0	0	0	0
6MVT5A	0	0	0	0	0	0
6TBVT5A	0	0	0	0	0	0
6MVT5B	0	0	0	0	0	0
6TBVT5B	0	0	0	0	0	0
1TBB6A	1	1	0	0	0	0
1MB6B	1	1	1	1	1	1
1MB6C	0	1	1	1	1	1
6MB1A	1	1	1	1	1	1
6TBB1B	1	1	1	1	1	1
6MB1C	1	1	1	1	1	1
6TBB1D	1	0	1	1	1	1
6TBB1E	0	1	0	0	0	0
6MB1F	1	1	1	1	1	1
66MB1G	1	0	1	1	1	1
66MB1H	0	1	0	0	0	0
9MC1A	0	0	1	1	1	1
9MC1B	0	1	0	0	0	0
9TBC1C	0	0	1	1	1	1
99MC2A	1	0	0	0	0	0
99MC2B	1	0	0	0	0	0
88TBB1A	0	1	0	0	0	0
88TBB1B	1	1	1	1	1	1
88MB1C	1	1	1	1	1	1
88MB1D	1	1	1	1	1	1
88MB1E	1	1	1	1	1	1
88MB1F	0	0	0	0	1	1
88MB1G	1	0	1	1	0	0
74B1A	0	0	0	0	0	0
74B1B	0	0	0	0	0	0
74B1C	0	0	0	0	0	0
8MB51C	0	1	0	0	0	0
zCONC	1	0	1	1	1	1

## E7- SITUAÇÃO DE 23 DE AGOSTO DE 2005

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	0	0	0	0	0
6MB4B	1	1	1	1	1	1
8MB51A	1	1	0	1	1	1
8TBB51B	1	0	1	1	0	1
88MB2A	1	1	0	1	1	0
88TBB2B	0	0	1	0	0	1
6MVT1	1	1	0	1	0	0
6TBVT1	0	0	1	0	1	1
6MVT2A	1	0	1	0	1	1
6TBVT2A	0	1	0	1	0	0
6MVT3A	1	0	1	0	1	1
6TBVT3A	0	1	0	1	0	0
6MVT3B	1	0	1	0	1	1
6TBVT3B	0	1	0	1	0	0
6MVT4A	0	0	0	0	0	0
6TBVT4A	0	0	0	0	0	0
6MVT4B	0	0	0	0	0	0
6TBVT4B	0	0	0	0	0	0
6MVT5A	0	0	0	0	0	0
6TBVT5A	0	0	0	0	0	0
6MVT5B	0	0	0	0	0	0
6TBVT5B	0	0	0	0	0	0
1TBB6A	1	0	0	0	0	0
1MB6B	1	1	1	1	1	1
1MB6C	0	1	1	1	1	1
6MB1A	1	1	1	1	1	1
6TBB1B	1	1	0	0	0	0
6MB1C	1	1	1	1	1	1
6TBB1D	0	1	1	1	1	1
6TBB1E	0	0	0	0	0	0
6MB1F	1	1	1	1	1	1
66MB1G	1	1	1	1	1	1
66MB1H	1	0	1	1	1	1
9MC1A	1	1	1	1	1	0
9MC1B	0	1	0	1	1	1
9TBC1C	0	1	0	0	0	0
99MC2A	1	0	1	1	1	1
99MC2B	1	0	1	0	0	1
88TBB1A	0	0	0	0	0	0
88TBB1B	1	1	1	1	1	1
88MB1C	1	1	1	1	1	1
88MB1D	1	1	1	1	1	1
88MB1E	1	1	1	1	1	1
88MB1F	0	1	1	1	1	1
88MB1G	1	0	0	0	0	0
74B1A	0	0	0	0	1	1
74B1B	0	0	1	0	0	0
74B1C	1	1	0	1	0	0
8MB51C	0	1	1	0	1	0
zCONC	1	1	1	1	1	1

## E8- SITUAÇÃO DE 17 DE SETEMBRO DE 2005

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	0	0	0	0	0
6MB4B	1	1	1	1	1	1
8MB51A	1	1	1	1	1	1
8TBB51B	1	1	1	1	1	1
88MB2A	1	0	0	0	0	0
88TBB2B	0	1	1	1	1	1
6MVT1	0	0	0	0	0	0
6TBVT1	0	0	0	0	0	0
6MVT2A	1	0	0	1	1	1
6TBVT2A	0	1	1	0	0	0
6MVT3A	1	0	0	1	1	1
6TBVT3A	0	1	1	0	0	0
6MVT3B	0	0	1	1	1	1
6TBVT3B	1	1	0	0	0	0
6MVT4A	1	1	1	1	1	1
6TBVT4A	0	0	0	0	0	0
6MVT4B	1	1	1	0	1	1
6TBVT4B	0	0	0	1	0	0
6MVT5A	0	1	1	1	1	1
6TBVT5A	1	0	0	0	0	0
6MVT5B	1	1	1	1	1	1
6TBVT5B	0	0	0	0	0	0
1TBB6A	0	0	0	0	0	0
1MB6B	1	1	1	1	1	1
1MB6C	1	1	1	1	1	1
6MB1A	1	0	1	1	1	1
6TBB1B	1	1	1	1	1	1
6MB1C	0	0	0	0	0	0
6TBB1D	1	1	1	1	1	1
6TBB1E	0	1	1	1	1	1
6MB1F	1	1	1	1	1	1
66MB1G	1	1	1	1	1	1
66MB1H	1	1	0	0	0	0
9MC1A	0	0	1	1	1	1
9MC1B	0	1	0	0	0	0
9TBC1C	0	1	1	1	1	1
99MC2A	1	0	0	0	0	0
99MC2B	1	0	0	0	0	0
88TBB1A	0	0	0	0	0	0
88TBB1B	1	1	1	1	1	1
88MB1C	1	1	1	1	1	1
88MB1D	1	1	1	1	1	1
88MB1E	1	1	1	1	1	1
88MB1F	0	1	1	1	1	1
88MB1G	1	0	0	0	0	0
74B1A	0	0	1	1	1	1
74B1B	1	1	0	0	0	0
74B1C	0	0	0	0	0	0
8MB51C	0	0	0	0	0	0
zCONC	1	0	0	0	0	0

## E9- SITUAÇÃO DE 19 DE SETEMBRO DE 2005

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	1	1	1	1	1
6MB4B	1	0	0	0	0	0
8MB51A	1	1	0	1	0	0
8TBB51B	0	1	1	1	1	1
88MB2A	1	0	0	0	0	0
88TBB2B	0	1	1	1	1	1
6MVT1	0	0	0	0	0	0
6TBVT1	0	0	0	0	0	0
6MVT2A	1	1	0	1	1	1
6TBVT2A	0	0	1	0	0	0
6MVT3A	1	1	1	1	1	1
6TBVT3A	0	0	0	0	0	0
6MVT3B	0	1	1	1	1	1
6TBVT3B	1	0	0	0	0	0
6MVT4A	1	0	1	0	1	1
6TBVT4A	0	1	0	1	0	0
6MVT4B	1	0	0	1	1	1
6TBVT4B	0	1	1	0	0	0
6MVT5A	0	1	1	1	1	1
6TBVT5A	1	0	0	0	0	0
6MVT5B	1	1	1	1	1	1
6TBVT5B	0	0	0	0	0	0
1TBB6A	1	0	0	0	0	1
1MB6B	1	1	1	1	1	1
1MB6C	0	1	1	1	1	0
6MB1A	1	1	1	1	1	1
6TBB1B	0	1	1	1	1	1
6MB1C	1	1	1	1	1	1
6TBB1D	0	0	0	0	0	0
6TBB1E	1	1	1	1	1	1
6MB1F	1	1	1	1	1	1
66MB1G	1	1	1	1	1	1
66MB1H	1	0	0	0	0	0
9MC1A	0	0	1	0	1	1
9MC1B	0	1	0	1	0	0
9TBC1C	0	1	1	1	1	1
99MC2A	1	0	0	0	0	0
99MC2B	1	0	0	0	0	0
88TBB1A	0	0	0	0	0	0
88TBB1B	1	1	1	1	1	1
88MB1C	1	1	1	1	1	1
88MB1D	1	1	1	1	1	1
88MB1E	1	1	1	1	1	1
88MB1F	0	1	1	1	1	1
88MB1G	1	0	0	0	0	0
74B1A	1	0	0	0	0	0
74B1B	0	1	1	1	1	1
74B1C	0	0	0	0	0	0
8MB51C	1	0	1	0	1	1
zCONC	1	1	1	1	1	1

## E10- SITUAÇÃO DE 20 DE SETEMBRO DE 2005

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	1	1	1	1	1
6MB4B	1	0	0	0	0	0
8MB51A	1	1	1	1	0	0
8TBB51B	0	1	1	1	1	1
88MB2A	1	0	0	0	0	0
88TBB2B	0	1	1	1	1	1
6MVT1	0	0	0	0	0	0
6TBVT1	0	0	0	0	0	0
6MVT2A	1	1	1	1	1	1
6TBVT2A	0	0	0	0	0	0
6MVT3A	1	1	1	1	1	1
6TBVT3A	0	0	0	0	0	0
6MVT3B	0	1	0	1	1	1
6TBVT3B	1	0	1	0	0	0
6MVT4A	1	1	1	0	1	1
6TBVT4A	0	0	0	1	0	0
6MVT4B	1	0	1	1	1	1
6TBVT4B	0	1	0	0	0	0
6MVT5A	0	1	1	1	1	1
6TBVT5A	1	0	0	0	0	0
6MVT5B	1	1	1	1	1	1
6TBVT5B	0	0	0	0	0	0
1TBB6A	1	1	1	0	0	0
1MB6B	1	0	1	1	1	1
1MB6C	0	1	0	1	1	1
6MB1A	1	1	1	1	1	1
6TBB1B	0	1	1	1	1	1
6MB1C	1	1	1	1	1	1
6TBB1D	0	1	1	1	1	1
6TBB1E	1	1	1	1	1	1
6MB1F	1	1	1	1	1	1
66MB1G	1	0	0	0	0	0
66MB1H	1	0	0	0	0	0
9MC1A	0	0	0	0	0	0
9MC1B	0	1	1	1	1	1
9TBC1C	0	1	1	1	1	1
99MC2A	1	0	0	0	0	0
99MC2B	1	0	0	0	0	0
88TBB1A	0	0	0	0	0	0
88TBB1B	1	1	1	1	1	1
88MB1C	1	1	1	1	1	1
88MB1D	1	1	1	1	1	1
88MB1E	1	1	1	1	1	1
88MB1F	0	1	1	1	1	1
88MB1G	1	0	0	0	0	0
74B1A	1	1	1	1	1	1
74B1B	0	0	0	0	0	0
74B1C	0	0	0	0	0	0
8MB51C	1	0	0	0	1	1
zCONC	1	1	1	1	1	1

## E11- SITUAÇÃO DE 3 DE OUTUBRO DE 2005

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	0	0	0	0	0
6MB4B	1	1	1	1	1	1
8MB51A	1	1	1	1	1	1
8TBB51B	1	1	1	1	1	1
88MB2A	1	0	0	0	0	0
88TBB2B	0	1	1	1	1	1
6MVT1	0	0	0	0	0	0
6TBVT1	0	0	0	0	0	0
6MVT2A	1	1	0	1	0	1
6TBVT2A	0	0	1	0	1	0
6MVT3A	0	0	0	1	0	0
6TBVT3A	1	1	1	0	1	1
6MVT3B	0	0	0	0	0	0
6TBVT3B	1	1	1	1	1	1
6MVT4A	1	0	0	1	1	1
6TBVT4A	0	1	1	0	0	0
6MVT4B	0	0	1	0	1	1
6TBVT4B	1	1	0	1	0	0
6MVT5A	1	1	1	1	1	0
6TBVT5A	0	0	0	0	0	1
6MVT5B	1	1	1	0	1	1
6TBVT5B	0	0	0	1	0	0
1TBB6A	0	0	0	0	0	0
1MB6B	1	1	1	1	1	1
1MB6C	1	1	1	1	1	1
6MB1A	1	1	1	1	1	1
6TBB1B	1	1	1	1	1	1
6MB1C	0	1	1	1	1	1
6TBB1D	1	1	1	1	1	1
6TBB1E	0	0	0	0	0	0
6MB1F	1	1	1	1	1	1
66MB1G	1	1	1	1	1	1
66MB1H	1	0	0	0	0	0
9MC1A	1	1	1	1	1	1
9MC1B	1	1	1	1	1	1
9TBC1C	0	1	1	1	1	1
99MC2A	1	1	1	1	1	1
99MC2B	1	0	0	0	0	0
88TBB1A	0	0	0	0	0	0
88TBB1B	1	1	1	1	1	1
88MB1C	1	1	1	1	1	1
88MB1D	1	1	1	1	1	1
88MB1E	1	1	1	1	1	1
88MB1F	0	1	1	1	1	1
88MB1G	1	0	0	0	0	0
74B1A	0	1	1	1	1	1
74B1B	1	0	0	0	0	0
74B1C	0	0	0	0	0	0
8MB51C	0	0	0	0	0	0
zCONC	1	1	1	1	1	1

## E12- SITUAÇÃO DE 9 DE FEVEREIRO DE 2006

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	1	1	1	1	1
6MB4B	1	0	0	0	0	0
8MB51A	1	0	0	0	0	0
8TBB51B	0	1	1	1	1	1
88MB2A	0	0	0	0	0	0
88TBB2B	1	1	1	1	1	1
6MVT1	0	0	0	0	0	0
6TBVT1	0	0	0	0	0	0
6MVT2A	1	1	1	1	1	1
6TBVT2A	0	0	0	0	0	0
6MVT3A	1	1	1	1	1	1
6TBVT3A	0	0	0	0	0	0
6MVT3B	1	1	1	1	1	1
6TBVT3B	0	0	0	0	0	0
6MVT4A	1	1	1	1	1	1
6TBVT4A	0	0	0	0	0	0
6MVT4B	1	1	1	1	1	1
6TBVT4B	0	0	0	0	0	0
6MVT5A	1	1	1	1	1	1
6TBVT5A	0	0	0	0	0	0
6MVT5B	1	1	1	1	1	1
6TBVT5B	0	0	0	0	0	0
1TBB6A	1	0	0	0	0	0
1MB6B	1	1	1	1	1	1
1MB6C	0	1	1	1	1	1
6MB1A	1	1	1	1	1	1
6TBB1B	0	1	1	1	1	1
6MB1C	1	1	1	1	1	1
6TBB1D	0	1	1	1	1	1
6TBB1E	1	0	0	0	0	0
6MB1F	1	1	1	1	1	1
66MB1G	1	1	1	1	1	1
66MB1H	1	0	0	0	0	0
9MC1A	0	0	0	1	1	0
9MC1B	0	1	1	1	1	1
9TBC1C	0	1	1	0	0	1
99MC2A	1	0	0	0	0	0
99MC2B	1	0	0	0	0	0
88TBB1A	0	0	0	0	0	0
88TBB1B	1	1	1	1	1	1
88MB1C	1	1	1	1	1	1
88MB1D	1	1	1	1	1	1
88MB1E	0	1	1	1	1	1
88MB1F	1	1	1	1	1	1
88MB1G	1	0	0	0	0	0
74B1A	0	1	1	1	1	1
74B1B	1	0	0	0	0	0
74B1C	0	0	0	0	0	0
8MB51C	1	1	1	1	1	1
zCONC	1	1	1	1	1	1

### E13- SITUAÇÃO DE 21 DE FEVEREIRO DE 2006

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	1	1	1	1	1
6MB4B	1	0	0	0	0	0
8MB51A	1	0	0	0	0	0
8TBB51B	1	1	1	1	1	1
88MB2A	0	0	0	0	0	0
88TBB2B	1	1	1	1	1	1
6MVT1	1	1	1	1	1	1
6TBVT1	0	0	0	0	0	0
6MVT2A	0	0	0	0	0	0
6TBVT2A	0	0	0	0	0	0
6MVT3A	0	0	0	0	0	0
6TBVT3A	0	0	0	0	0	0
6MVT3B	0	0	0	0	0	0
6TBVT3B	0	0	0	0	0	0
6MVT4A	1	1	0	1	0	0
6TBVT4A	0	0	1	0	1	1
6MVT4B	1	0	0	0	1	0
6TBVT4B	0	1	1	1	0	1
6MVT5A	0	0	0	0	1	0
6TBVT5A	1	1	1	1	0	1
6MVT5B	0	0	1	0	0	1
6TBVT5B	1	1	0	1	1	0
1TBB6A	0	0	1	0	1	1
1MB6B	1	1	0	1	1	0
1MB6C	1	1	1	1	0	1
6MB1A	1	1	1	1	1	1
6TBB1B	0	1	1	1	1	1
6MB1C	1	1	1	1	1	1
6TBB1D	0	1	1	1	1	1
6TBB1E	1	0	0	0	0	0
6MB1F	1	1	1	1	1	1
66MB1G	1	1	1	1	1	1
66MB1H	1	0	0	0	0	0
9MC1A	0	0	0	0	0	0
9MC1B	0	1	1	1	1	1
9TBC1C	0	1	1	1	1	1
99MC2A	1	0	0	0	0	0
99MC2B	1	0	0	0	0	0
88TBB1A	0	0	0	0	0	0
88TBB1B	1	1	1	1	1	1
88MB1C	1	1	1	1	1	1
88MB1D	1	1	1	1	1	1
88MB1E	0	1	1	1	1	1
88MB1F	1	1	1	1	1	1
88MB1G	1	0	0	0	0	0
74B1A	0	1	1	1	1	1
74B1B	1	0	0	0	0	0
74B1C	0	0	0	0	0	0
8MB51C	0	1	1	1	1	1
zCONC	1	1	1	1	1	1

## E14- SITUAÇÃO DE 23 DE FEVEREIRO DE 2005

Equipamento	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
6TBB4A	0	1	1	1	1	1
6MB4B	1	0	0	0	0	0
8MB51A	0	0	0	0	0	0
8TBB51B	1	1	1	1	1	1
88MB2A	0	0	0	0	0	0
88TBB2B	1	1	1	1	1	1
6MVT1	1	1	1	1	1	1
6TBVT1	0	0	0	0	0	0
6MVT2A	0	0	0	0	0	0
6TBVT2A	0	0	0	0	0	0
6MVT3A	0	0	0	0	0	0
6TBVT3A	0	0	0	0	0	0
6MVT3B	0	0	0	0	0	0
6TBVT3B	0	0	0	0	0	0
6MVT4A	1	1	1	0	1	1
6TBVT4A	0	0	0	1	0	0
6MVT4B	1	0	0	1	1	0
6TBVT4B	0	1	1	0	0	1
6MVT5A	1	0	1	0	1	1
6TBVT5A	0	1	0	1	0	0
6MVT5B	0	1	0	1	0	0
6TBVT5B	1	0	1	0	1	1
1TBB6A	0	1	1	0	1	1
1MB6B	1	1	1	1	1	1
1MB6C	1	0	0	1	0	0
6MB1A	0	1	1	1	1	1
6TBB1B	0	1	1	1	1	1
6MB1C	1	1	1	1	1	1
6TBB1D	1	1	1	1	1	1
6TBB1E	1	0	0	0	0	0
6MB1F	1	1	1	1	1	1
66MB1G	1	1	1	1	1	1
66MB1H	1	0	0	0	0	0
9MC1A	1	1	1	1	1	1
9MC1B	0	1	1	1	1	1
9TBC1C	0	1	1	1	1	1
99MC2A	1	0	0	0	0	0
99MC2B	1	0	0	0	0	0
88TBB1A	0	0	0	0	0	0
88TBB1B	1	1	1	1	1	1
88MB1C	1	1	1	1	1	1
88MB1D	1	1	1	1	1	1
88MB1E	0	1	1	1	1	1
88MB1F	1	1	1	1	1	1
88MB1G	1	0	0	0	0	0
74B1A	0	1	1	1	1	1
74B1B	1	0	0	0	0	0
74B1C	0	0	0	0	0	0
8MB51C	1	1	1	1	1	1
zCONC	1	1	1	1	1	1

## APÊNDICE F: OTIMIZAÇÃO COM RESTRIÇÃO – ABORDAGEM A PROBLEMAS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

A aplicação de técnicas de otimização vem cada vez mais se tornando um viabilizador de ganhos em competitividade na engenharia de sistemas de processos, evoluindo de uma metodologia de interesse acadêmico em uma tecnologia que traz impacto significativo no segmento industrial (Biegler e Grossmann, 2003).

De forma geral, um problema de otimização envolve restrições de igualdade e desigualdade, e pode ser representado por

$$\begin{aligned}
 X^* &= \arg \min_x S(x) \\
 \text{s.a. :} \\
 h_j(x) &= 0, j = 1, 2, \dots, m \\
 g_j(x) &\leq 0, j = 1, 2, \dots, p \\
 x &\in X \subseteq \mathfrak{R}^n
 \end{aligned} \tag{82}$$

Onde  $S(x)$ ,  $g(x)$  e  $h(x) \in C^2$ . Diz-se que  $x^*$  é um mínimo global (ou absoluto) de  $S$  se  $S(x^*) \leq S(x) \forall x \in X$ , e que  $x^*$  é um mínimo local (ou relativo) de  $S$  se existe  $\varepsilon > 0$ , tal que  $S(x^*) \leq S(x) \forall x$  tal que  $\|x - x^*\| < \varepsilon$ . Se as desigualdades forem estritas, isto é,  $S(x^*) < S(x)$  tem-se mínimos globais e locais estritos.

A otimalidade de um problema de otimização com restrições é analisada através da transformação do mesmo em um problema sem restrições. A transformação é realizada através da função de Lagrange,  $L(x, \lambda, \mu)$ , onde  $\lambda$  e  $\mu$  são multiplicadores de Lagrange e a função é definida como:

$$L(x, \lambda, \mu) = S(x) + \lambda^T h(x) + \mu^T g(x), \mu \geq 0 \tag{83}$$

E o problema é transformado em:

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \min_{x \in X} L(x, \lambda, \mu) \\
 \lambda, \mu \geq 0 \quad &
 \end{aligned} \tag{84}$$

Para que  $x^*$  seja um ótimo local do problema com restrições, com  $S(x)$ ,  $g(x)$ , e  $h(x)$  diferenciáveis em  $x^*$ , é necessário que os gradientes das restrições de desigualdade ativas,  $\nabla g_j(x^*)$ , e das restrições de igualdade,  $\nabla h(x^*)$ , sejam linearmente independentes, e que as seguintes condições sejam satisfeitas (condição necessária de primeira ordem de Karush-Kuhn-Tucker):

$$\nabla_x L(x^*, \lambda^*, \mu^*) = \nabla S(x^*) + (\lambda^*)^T \nabla h(x^*) + (\mu^*)^T \nabla g(x^*) = 0 \quad (85)$$

$$h(x^*) = 0$$

$$g(x^*) \leq 0$$

$$\mu_j^* g_j(x^*) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \text{ (condições de complementaridade)}$$

$$\mu^* \geq 0$$

Para que  $x^*$  seja um mínimo local do problema com restrições, com  $S(x)$ ,  $g(x)$ , e  $h(x)$  duas vezes diferenciáveis em  $x^*$ , é necessário que a condição de primeira ordem de KKT seja satisfeita e, que a matriz Hessiana da função de Lagrange,  $\nabla_x^2 L(x^*, \lambda^*, \mu^*)$ , seja positiva semidefinida para todo vetor não nulo  $d$  tal que (condição necessária de segunda ordem de Karush-Kuhn-Tucker):

$$d^T \nabla h_i(x^*) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (86)$$

$$d^T \nabla g_j(x^*) = 0 \text{ para as } g_j(x^*) \text{ ativas } \{ g_j(x^*) = 0 \text{ e } \mu_j^* > 0 \}$$

$$d^T \nabla g_j(x^*) \leq 0 \text{ para as } g_j(x^*) \text{ inativas } \{ g_j(x^*) < 0 \text{ e } \mu_j^* = 0 \}$$

$$\text{isto é, } d^T \nabla_x^2 L(x^*, \lambda^*, \mu^*) d \geq 0$$

Se a última desigualdade acima for estrita tem-se a condição suficiente de KKT.

O conceito de convexidade é também muito conveniente no estudo das condições de otimalidade. Um subconjunto  $K$  de um espaço vetorial  $X$  é dito convexo se  $\forall x_1, x_2 \in K$  e  $0 \leq \alpha \leq 1$ :

$$\alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2 \in K \quad (87)$$

Seja  $K$  um convexo não vazio do  $\Re^n$ . A função  $S: K \rightarrow \Re$  é dita convexa se  $\forall x_1, x_2 \in K$  e  $0 \leq \alpha \leq 1$ :

$$S[\alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2] \leq \alpha S(x_1) + (1 - \alpha) S(x_2)$$

A função  $S(x)$  é estritamente convexa se a desigualdade for estrita. Uma função  $T(x)$  é côncava se a função  $S(x) = -T(x)$  for convexa.

Quando  $S(x)$  é convexa, as condições de otimalidade simplificam-se, porque as condições de segunda ordem são equivalentes à convexidade local da função. Além disso, um mínimo local será também global e se a função for estritamente convexa o mínimo global é único (Secchi, 2003).

Problemas de programação linear, por sua vez, são do tipo de programação convexa, onde a função objetivo é convexa e as restrições lineares formam um conjunto convexo, e assim o ótimo local será ótimo global. Outra característica interessante é que a solução de um problema de programação linear sempre é encontrada em uma restrição ou em intersecção de restrições, e não no interior da região convexa, onde as restrições de desigualdade estariam satisfeitas. Genericamente, um problema de programação linear pode ser representado por:

$$X^* = \arg \min \{ S(x) = \sum_{i=1}^r c_i x_i = c^T x \}$$

Sujeito à  $x_i \geq 0$  com  $i = 1, 2, \dots, r$

$$\text{e } \sum_{i=1}^r a_{ji} x_i = b_j \text{ com } j = 1, 2, \dots, m \text{ ou } \mathbf{A}_1 \mathbf{x} = \mathbf{b}_1 \quad (88)$$

$$\text{e } \sum_{i=1}^r a_{ji} x_i \leq b_j \text{ com } j = m+1, \dots, p \text{ ou } \mathbf{A}_2 \mathbf{x} \leq \mathbf{b}_2$$

Desta forma, há  $r$  variáveis com  $r$  restrições não negativas,  $(p-m)$  restrições de desigualdade e  $m$  restrições de igualdade.

O primeiro procedimento analítico para lidar com problemas de programação linear de grande dimensão, criado por Dantzig, em 1947, foi o algoritmo iterativo Simplex, que visa melhorar a função objetivo considerando o seu valor a cada intersecção de restrições. As restrições de desigualdade são convertidas para igualdade a partir da introdução de novas variáveis, chamadas variáveis de folga. Quando atribui-se valores nulos para as variáveis não básicas e obtém-se valores não negativos para as

variáveis básicas, tem-se uma solução básica viável (ou simplesmente solução básica), caso contrário tem-se um ponto inviável. Se alguma variável básica for nula, então tem-se uma solução básica degenerada, sendo necessário substituir as variáveis básicas nulas por variáveis não básicas. O procedimento do algoritmo simplex pode ser apresentado pelos seguintes passos:

- Conversão de todas as restrições de desigualdade de forma que o lado direito da equação fique positivo;
- Introduzir variáveis de folga e converter as restrições de desigualdade para igualdade;
- Definir uma solução básica correspondendo a um vértice ou intersecção da região de viabilidade;
- Seleção de novas variáveis básicas e não básicas, no caso da seleção inicial não corresponder ao ótimo;
- Através de operações matriciais (eliminação Gaussiana e pivoteamento), transformar as equações de uma solução básica para outra;
- Verificar a função objetivo e se necessário proceder a novas operações matriciais até não haver melhora na função objetivo.

O procedimento visa encontrar o ótimo de forma eficiente, mas não necessariamente utiliza a menor rota. Na prática, o número de iterações para atingir o ótimo encontra-se entre  $m$  e  $3m$ , dependendo mais fortemente do número de restrições do que do número de variáveis. Procedimentos mais atuais, em código de computação, evitam cálculos desnecessários ligados ao fato de que os pivôs podem ocorrer na prática em uma pequena fração de colunas (Edgar et Himmelblau, 1988).

O problema de programação linear foi visto até o momento por sua forma primal, mas poderia ter sido formulado alternativamente pela forma dual, que envolve os coeficientes de Lagrange. Posto da forma dual, observa-se que os coeficientes da função objetivo do problema primal tornaram-se as constantes do lado direito das equações de restrições do dual, assim como os coeficientes da função objetivo do problema dual são os coeficientes do lado direito das equações de restrição do problema primal.

Inversamente, o problema de minimização na forma primal torna-se de maximização na forma dual, e o sentido das desigualdades é invertido. Há uma variável dual para cada restrição primal e uma restrição dual para cada variável primal. É possível resolver os problemas primal e dual em conjunto para garantir que há convergência acima e abaixo do valor da função objetivo. Do ponto de vista computacional, há vantagens em aplicar a solução do dual em um dado problema, especialmente quando envolve muitas restrições e a viabilidade é dificultada. O algoritmo Simplex Dual não necessita de uma solução básica viável em  $x$ , já que o problema dual tem diferentes restrições que o primal.

Em alternativa ao método Simplex, em 1984 Karmakar propôs um algoritmo para resolver problemas de larga escala. A estratégia deste algoritmo é encontrar direções de procura melhoradas estritamente dentro da região restrita (ao contrário do método Simplex, onde a busca é realizada nos limites, de vértice para vértice) até encontrar o ótimo. Em problemas de larga escala, o número de vértices é muito grande, sendo proibitivo o uso de método Simplex devido ao tempo computacional exigido (Edgar et Himmelblau, 1988).

Em muitos problemas operacionais, de planejamento ou projeto, há o envolvimento de variáveis não contínuas, que levam valores inteiros. Variáveis de decisão que envolvem dicotomias são conhecidas como variáveis “0-1”. Outras variáveis inteiras podem ser números reais como 0, 1, 2, 3, etc. Em algumas situações é possível tratar as variáveis inteiras como se fossem contínuas (principalmente quando assumem grandes valores) e arredondar a solução ótima para o valor inteiro mais próximo, o que leva a uma solução sub-ótima, mas ainda aceitável do ponto de vista prático. Todavia, quando a resposta é um número como 1.3, a precisão obtida com o arredondamento não é adequada.

A maioria dos problemas de programação inteira é inerentemente combinatorial por natureza, isto é, as variáveis inteiras na função objetivo correspondem a  $n$  elementos tomados  $m$  a  $m$  de forma que o número possível de combinações a considerar é  $\binom{n}{m}$ , ou corresponde a permutação de  $n$  elementos de forma que o número de possibilidades é  $n!$ .

O caso mais geral desta classe de programação são os problemas de programação inteira-mista (MIP), no qual a função objetivo depende de dois conjuntos de variáveis, aqui representadas como  $y$  (vetor das variáveis inteiras) e  $x$  (vetor das variáveis contínuas). Se apenas variáveis inteiras fossem envolvidas ( $x_i = 0$ ), seria um problema de programação inteira (IP), na qual a programação inteira binária (BIP) é um caso especial, onde todas as variáveis  $y_i$  são 0 ou 1. Muitos problemas MIP são lineares na função objetivo e restrições, e assim são sujeitos a solução via programação linear, sendo que os problemas são classificados como MILP.

A formulação MILP com variáveis 0–1 é dada por:

$$\min_{x, y} \{S(x, y) = c^T x + d^T y\} \quad (89)$$

sujeito a:  $A x + B y \leq b$

$x \geq 0$

$x \in X \subseteq \mathfrak{R}^n, y \in Y = \{0, 1\}^q$

Para um dado valor do vetor  $y$ , o problema acima recai em um caso de programação linear (LP). A solução poderia ser obtida aplicando uma busca exaustiva, enumerando todas as possíveis combinações de variáveis 0–1 para os elementos do vetor  $y$ , mas para problemas de médio e grande porte este procedimento torna-se proibitivo, devido a natureza combinatorial.

Já nos algoritmos “*branch and bound*” (Land et Doig, 1960), uma árvore binária é empregada para representar as combinações 0–1, a região viável é sistematicamente particionada em subdomínios, e limites inferiores e superiores são gerados em diferentes níveis da árvore. Denotando o problema MILP na equação 38 por (P) e o conjunto de suas soluções viáveis por FS(P), então o conjunto de subproblemas (P1), (P2), ..., (Pn) de (P) é uma separação de (P) se:

- (i) Uma solução viável de qualquer subproblema (P1), (P2), ..., (Pn) é também uma solução viável de (P);

(ii) Cada solução viável de (P) é uma solução viável de exatamente um de seus subproblemas. Neste caso, o problema (P) é chamado de problema *Pai* e os subproblemas (P1), (P2),..., (Pn) são chamados de problemas *Filhos*.

Uma questão importante no método de *branch and bound* é de como gerar uma separação do problema (P). A maneira geralmente utilizada é a introdução de restrições contraditórias em uma única variável binária (ou inteira) a cada estágio. Por exemplo, selecionando a variável binária  $y_1$  de (P), pode-se separá-lo, ou ramificá-lo (*branching*), em dois subproblemas (P1) e (P2), e assim por diante construindo-se a árvore binária:

$$\begin{array}{l}
 P_1 \left\{ \begin{array}{l}
 \min S(x,y) = c^T x + d^T y \\
 \text{sujeito a: } Ax + By \leq b \\
 x \geq 0 \\
 y_1 = 0 \\
 x \in X \subseteq \mathfrak{R}^n \\
 y \in Y = \{0,1\}^q
 \end{array} \right.
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 P_2 \left\{ \begin{array}{l}
 \min S(x,y) = c^T x + d^T y \\
 \text{sujeito a: } Ax + By \leq b \\
 x \geq 0 \\
 y_1 = 1 \\
 x \in X \subseteq \mathfrak{R}^n \\
 y \in Y = \{0,1\}^q
 \end{array} \right.
 \end{array}
 \quad (90)$$

Um problema de otimização, denotado por (RP), é uma relaxação do problema (P) se o conjunto de soluções viáveis de (P) é um subconjunto de soluções viáveis de (RP), isto é,  $FS(P) \subseteq FS(RP)$ . Deste modo, se (RP) não tem solução viável, então (P) também não tem. Além disto, a solução do problema relaxado fornece um *limite inferior* para a solução do problema original. Naturalmente, se a solução ótima de (RP) é viável para (P), então ela é a solução ótima de (P).

A forma de relaxação mais freqüentemente utilizada em problemas MILP é tornar as variáveis binárias em variáveis contínuas:  $0 \leq y \leq 1$ , gerando um problema LP relaxado. Outra forma de relaxação é remoção de algumas restrições de (P). Porém, existe um compromisso entre a relaxação e a qualidade do limite inferior (solução de RP) para a solução ótima. Em geral, quanto mais fácil for a solução do problema relaxado (maior relaxamento), maior será a diferença entre as soluções de RP e P.

A sondagem de um subproblema, ou seja, a verificação se uma região viável de dado subproblema candidato contém a ótima solução de (P) pode ocorrer se tal região não contar uma solução melhor do que a melhor das soluções já encontradas em estágios

anteriores ou então se foi encontrada a solução ótima do referido subproblema. Em qualquer uma destas duas situações o subproblema mencionado não necessita de novas separações.

Denotando por (RCS) uma relaxação do subproblema (CS), e  $z_{RCS}$  a sua solução ótima, então os critérios gerais de sondagem em um algoritmo de *branch and bound*, baseado em relaxação, são:

- 1) Se (RCS) não possui solução viável, então (CS) também não possui e pode ser considerado sondado;
- 2) Se  $z_{RCS} \geq z^*$  (solução titular), então (CS) está sondado;
- 3) Se uma solução ótima de (RCS) é viável para (CS), então ela é também uma solução ótima de (CS), portanto o problema (CS) pode ser considerado sondado. Neste caso, a solução também é viável para (P) e se  $z_{RCS} < z^*$ , então a solução titular é substituída por esta nova solução, senão  $z_{RCS}$  é um *limite superior* para o problema.

Note que é possível ter  $z_{CS} \geq z^* > z_{RCS}$ , e neste caso (CS) não pode ser considerado sondado, sendo  $z_{RCS}$  um *limite inferior* para o problema. Portanto, quanto menor a diferença entre a solução do problema (RCS) e o problema (CS), mais frequentemente estes critérios serão utilizados para eliminar ramificações. O sucesso dos algoritmos de *branch and bound* está baseado no percentual de eliminação de subproblemas e no esforço requerido para resolver os subproblemas candidatos. Um algoritmo genérico para os métodos de *branch and bound* pode ser descrito como segue:

- 1) Inicializar a lista de subproblemas (CS) = (P), ou árvore binária,  $z^* = \infty$ ;
- 2) **Se** a lista de subproblemas (CS) estiver vazia, **então** FIM (se  $z^* = \infty$ , então não existe solução viável);
- 3) Selecionar um candidato da lista, tornado-o candidato (CS) corrente;
- 4) Selecionar e resolver uma relaxação (RCS) do (CS) corrente, obtendo a solução  $z_{RCS}$ ;
- 5) Aplicar os três critérios de sondagem:
  - (i) se (RCS) é inviável, **então** o (CS) corrente não tem solução viável e (ir para 2);
  - (ii) **Se**  $z_{RCS} \geq z^*$ , **então** o (CS) corrente não tem solução viável melhor que  $z^*$  e (ir para 2);

(iii) Se a solução ótima de (RCS) é viável para (CS) e  $z_{RCS} < z^*$ , então  $z^* \leftarrow z_{RCS}$  e (ir para 2);

6) Separar o (CS) corrente e adicionar os seus subproblemas filhos na lista de subproblemas (CS). (Ir para 2).

Existem três alternativas principais para selecionar os candidatos da árvore

Binária:

a) Busca em primeira profundidade (*depth-first search*) com retrocesso (LIFO: *Last-In-First-Out*). Técnica padrão da maioria dos algoritmos;

b) Busca em primeira largura (*breadth-first search*);

c) Busca pelo melhor limite.

Na técnica de busca em primeira profundidade o próximo (CS) selecionado é um dos filhos do (CS) corrente. Quando um nó é considerado sondado, a busca é retrocedida até o ancestral mais próximo que tenha um filho que ainda não foi selecionado. Esta técnica tem como característica uma maior facilidade de reotimização e compactação de informação, mas pode requerer um número elevado de subproblemas (CS).

Na técnica de busca em primeira largura, todos os nós de um mesmo nível da árvore binária são considerados antes dos nós de níveis subsequentes. Esta técnica é geralmente utilizada como base de heurísticas para a seleção de nós para a melhoria dos limites inferiores.

Na técnica de busca pelo melhor limite, o próximo (CS) escolhido da lista é aquele que possui o menor limite inferior. Esta técnica resulta em um menor número de subproblemas (CS), mas apresenta uma maior heterogeneidade no caminho para o ótimo. Nota-se que existe um compromisso entre o número de (CS) gerados e o controle da otimização, dificultando a seleção da melhor estratégia (Secchi, 2003).

## APÊNDICE G: RESULTADOS E DISCUSSÕES ESPECÍFICOS PARA O ESTUDO DE CASOS

### G.1 SITUAÇÃO 1

TABELA 15: Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 07/05/05, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1117.7	1134.9	1134.3	1136.9	1113.5	1106.9
Variação em vazão VS (caldeiras) (%)	-	4.8%	4.6%	5.3%	-3.2%	-5.1%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	15.4	25.0	10.0	20.0	20.0	10.0
Var. vazão em valv. redutoras VS/VA (%)	-	62.3%	-35.1%	29.9%	29.9%	-35.1%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	18.0	0.0	10.0	17.0	20.0	10.0
Var. vazão em valv. redutoras VA/VM (%)	-	-100.0%	-44.5%	-5.6%	11.1%	-44.5%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	30.8	0.3	15.0	17.3	35.0	15.5
Var. vazão em valv. redutoras VM/VB (%)	-	-99.0%	-51.3%	-44.0%	13.4%	-49.9%
Vazão em alívios de VB (t/h)	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	57.0	52.3	53.2	53.2	55.0	53.4
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	46.5	80.6	70.3	70.3	43.4	67.2
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	20.7	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	10.1	8.8	3.7	0.9	8.8	6.0
Variação da vazão de extração de VA * (%)	-	-5.2%	2.7%	0.8%	-11.1%	1.1%
Variação da vazão de extração de VM (%)	-	1.3%	0.9%	-2.0%	6.2%	1.9%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	174.7	189.3	188.9	193.2	171.3	161.9
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	647.2	654.9	669.3	661.9	638.5	641.9
<b>Custo Total (R\$/h)</b>	<b>15503.8</b>	<b>14728.8</b>	<b>14765.8</b>	<b>14931.8</b>	<b>14481.1</b>	<b>14063.7</b>
Redução de custo (%)	-	5.0%	4.8%	3.7%	6.6%	9.3%

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

Observando, na Tabela 15, a situação real do sistema termoeletrico em 07/05/05 nota-se a ausência de alívios de vapor e baixa utilização das válvulas redutoras VS/VA e VM/VB, comparando-se com as situações comumente observadas. Aqui, as otimizações priorizaram a geração de energia nos turbogeradores, mantendo a turbina a gás em 30 MW, tendo em vista o preço da energia importada, que então é minimizada. Observa-se ser mais vantajoso aumentar a produção de vapor nas caldeiras, para maior consumo nos turbogeradores, mesmo havendo aumento na vazão de condensação, o que em geral representa uma condição menos eficiente para o sistema de cogeração, devido ao

aumento de calor perdido para o sistema de água de resfriamento. A maior evolução ocorrida com a otimização relaciona-se ao consumo energético, que cai em cerca de 3,6 MW devido principalmente ao aumento do uso de turbinas VA/VB.

Finalmente, observa-se pelos resultados obtidos entre os casos de 2 e 3, que quanto menor a vazão de vapor nas redutoras menor o custo total, havendo vantagens na busca pela redução desta passagem de vapor, apesar do caso 2 apresentar uma pequena abertura de alívio de VB. Observando o caso 1, verifica-se que mesmo com fechamento total das válvulas redutoras VA/VM e VM/VB, a vazão de VS gerado ainda foi maior do que o caso 2, que apresenta passagem de  $5 \text{ t.h}^{-1}$  em todas as válvulas – a explicação reside no impacto causado pela necessidade de uma passagem mínima total de  $25 \text{ t.h}^{-1}$  no nível VS/VA. Por outro lado, o caso 1 obteve um custo menor do que o caso 2, devido ao fato de poder utilizar mais turbinas VA/VB e VM/VB (reduzindo mais às demandas de energia elétrica) e assim também dependendo menos de abertura em redutoras VM/VB e VA/VM.

Os resultados para esta condição evidenciam que nem sempre a situação otimizada em termos de custo apresenta minimização da produção de vapor de superalta pressão. Em relação à seleção de acionadores, conforme apêndice E1, verifica-se o atendimento do número de equipamentos necessários. Também se manteve a preferência por acionadores motorizados nos ventiladores das caldeiras. Já em relação às bombas de BFW, nos casos 1, 2, 3 e 5 há mais uma turbina em relação ao caso atual. Confirma-se assim, na maioria dos casos a preferência por turbinas VA/VB e a redução do uso de turbinas VA/VM.

## G.2 SITUAÇÃO 2

TABELA 16: Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 29/05/05, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1144.6	1149.9	1147.6	1150.4	1132.5	1122.7
Variação em vazão VS (caldeiras) (%)	-	1.4%	0.8%	1.6%	-4.6%	-7.9%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	40.9	25.0	10.0	20.0	20.0	10.0
Var. vazão em valv. redutoras VS/VA (%)	-	-38.8%	-75.5%	-51.0%	-51.0%	-75.5%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	39.6	0.0	10.0	17.0	20.0	10.0
Var. vazão em valv. redutoras VA/VM (%)	-	-100.0%	-74.7%	-57.1%	-49.5%	-74.7%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	69.5	47.8	47.8	47.8	47.8	47.8
Var. vazão em valv. redutoras VM/VB (%)	-	-31.3%	-31.3%	-31.3%	-31.3%	-31.3%
Vazão em alívios de VB (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	56.2	52.2	52.5	52.9	52.9	52.9
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	29.5	53.1	53.1	53.1	53.1	53.1
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	32.9	25.5	16.4	4.5	4.5	4.5
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	9.0	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Variação da vazão de extração de VA * (%)	-	-3.5%	5.7%	-2.7%	-1.1%	-0.7%
Variação da vazão de extração de VM (%)	-	10.0%	9.4%	11.0%	9.9%	13.7%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	170.3	170.3	167.6	171.6	153.8	142.6
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	631.4	652.6	665.3	658.1	640.2	640.4
Custo Total (R\$/h)	<b>16338.1</b>	<b>14992.6</b>	<b>14878.4</b>	<b>15038.9</b>	<b>14586.9</b>	<b>14242.9</b>
Redução de custo (%)	-	8.2%	8.9%	8.0%	10.7%	12.8%

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

Observa-se na Tabela 16 que as otimizações mantiveram a ausência de alívios. Há uma redução de 3,3 MW, e a carga das caldeiras é mantida próxima do valor observado durante a situação, com exceção dos casos onde a turbina a gás pode operar até 38 MW, onde há ganhos com a redução da produção de vapor. Observa-se em todos os casos reduções nas passagens em redutoras, refletindo o aproveitamento maior de turbinas VA/VB, em preferência a turbinas VA/VM (cujo consumo é reduzido) – neste caso, o suprimento de VM é garantido por maior extração nos 22TBC01 e 4TBC21. Se atendida a condição de projeto nas redutoras e realizados os ajustes necessários, é possível obter-se operacionalmente uma redução de 8,0% no custo da central, com ganhos maiores no caso de tolerar-se uma passagem de no máximo 5 t.h<sup>-1</sup> por cada redutora (principalmente nas redutoras VS/VA, se compararmos as situações dos casos 1 e 2). Nos casos que

envolvem operação da turbina a gás gerando até 38 MW, a geração elétrica na turbina a gás, mais barata, é maximizada, reduzindo a produção nos turbogeradores e assim, diminuindo a necessidade de geração de vapor nas caldeiras da central termelétrica. A redução de carga elétrica nos turbogeradores nos casos 4 e 5 também é acompanhada por uma menor geração de vazão de condensado, melhorando assim a eficiência do ciclo.

### G.3 SITUAÇÃO 3

TABELA 17: Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 06/06/05, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1207.9	1187.3	1185.0	1187.5	1166.2	1157.2
Variação em vazão VS (caldeiras) (%)	-	-4.5%	-5.0%	-4.5%	-10.6%	-12.9%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	41.7	25.0	10.0	20.0	20.0	10.0
Var. vazão em valv. redutoras VS/VA (%)	-	-40.0%	-76.0%	-52.0%	-52.0%	-76.0%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	50.0	0.0	10.0	17.0	20.0	10.0
Var. vazão em valv. redutoras VA/VM (%)	-	-100.0%	-80.0%	-66.0%	-60.0%	-80.0%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	62.8	43.3	43.3	43.3	43.3	43.3
Var. vazão em valv. redutoras VM/VB (%)	-	-31.0%	-31.0%	-31.0%	-31.0%	-31.0%
Vazão em alívios de VB (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	58.2	52.6	52.9	53.1	54.5	54.0
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	46.8	67.9	67.9	67.9	67.9	67.9
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	20.7	62.7	53.6	46.5	4.5	20.7
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	9.0	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Variação da vazão de extração de VA * (%)	-	18.1%	28.0%	21.7%	-1.0%	8.8%
Variação da vazão de extração de VM (%)	-	-3.0%	-3.5%	-3.7%	10.0%	8.1%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	224.8	198.3	195.6	199.3	178.1	167.8
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	679.1	675.1	687.9	680.4	659.1	660.1
Custo Total (R\$/h)	<b>17958.6</b>	<b>16833.9</b>	<b>16720.1</b>	<b>16868.0</b>	<b>16358.8</b>	<b>16028.2</b>
Redução de custo (%)	-	6.3%	6.9%	6.1%	8.9%	10.7%

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

A situação ocorre no início do horário de ponta. Além das economias consideráveis em termos do custo variável da central termelétrica, é possível obter redução razoável da geração de vapor nas caldeiras e da necessidade de energia elétrica. A estratégia baseia-se na redução de passagem por redutoras e de uso de vapor condensante (vide Tabela 17), aumentando o uso de turbinas e de extração de VA, reduzindo assim a demanda elétrica em consideráveis 5 MW.

Devido a esta economia, a geração nos turbogeradores foi reduzida e não houve compra de energia elétrica, também sob influência do preço incrementado pela tarifa. Apesar do consumo de VS de grandes turbinas permanecer praticamente o mesmo nos casos operacionais (reduz quando a turbina a gás pode gerar até o limite de 38 MW) há uma diminuição da geração de condensado de vácuo, melhorando o aproveitamento energético. Há uma série de ajustes operacionais possíveis, que podem levar a ganhos de 6 a 7 %. Ganhos maiores são obtidos apenas com a maximização da geração elétrica da turbina a gás e minimização do consumo de VS nos turbogeradores.

Em relação à seleção de acionadores, também cumpriu-se o número de equipamentos necessário, obedecendo às restrições de disponibilidade de equipamentos. Conforme se observa no apêndice E3, a bomba de água de alimentação de caldeira 6B01 E não pode ser utilizada devido a estar em manutenção, e a tendência de que ela fosse utilizada era grande, tendo em vista o aumento do uso de turbinas conforme observado na Tabela 17.

## G.4 SITUAÇÃO 4

TABELA 18: Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 27/06/05, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1205.3	1104.2	1102.6	1105.4	-	1102.5
Variação em vazão VS (caldeiras) (%)	-	-20.3%	-20.7%	-20.1%	-	-20.7%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	42.8	25.0	10.0	20.0	-	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VS/VA (%)	-	-41.6%	-76.6%	-53.3%	-	-76.6%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	71.5	0.0	10.0	17.0	-	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VA/VM (%)	-	-100.0%	-86.0%	-76.2%	-	-86.0%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	105.0	6.2	15.8	18.4	-	15.8
Var. vazão em válv. redutoras VM/VB (%)	-	-94.1%	-85.0%	-82.5%	-	-85.0%
Vazão em alívios de VB (t/h)	79.7	0.0	0.0	0.0	-	0.0
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	57.1	53.6	54.2	54.5	-	54.2
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	29.1	51.4	41.1	41.1	-	41.1
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	50.0	28.3	28.3	20.7	-	28.3
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	4.7	8.8	8.8	6.0	-	8.8
Variação da vazão de extração de VA * (%)	-	-25.4%	-17.6%	-23.2%	-	-17.6%
Variação da vazão de extração de VM (%)	-	1.2%	0.8%	0.8%	-	0.8%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	245.0	210.4	209.1	213.2	-	209.0
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	714.4	631.1	644.6	637.3	-	644.4
<b>Custo Total (R\$/h)</b>	<b>19129.1</b>	<b>15259.6</b>	<b>15232.1</b>	<b>15405.1</b>	-	<b>15227.2</b>
<b>Redução de custo (%)</b>	-	<b>20.2%</b>	<b>20.4%</b>	<b>19.5%</b>	-	<b>20.4%</b>

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

A situação envolve a parada da turbina a gás (portanto, o caso 4 não foi avaliado e o caso 5 ficou restrito à redução do limite de potência mínima para os turbogeradores a vapor), com presença de alívios de VB no caso real, conforme Tabela 18. Para esta situação, os diversos casos de otimização levam a reduções significativas na produção de vapor e no custo da central termoeletrica, preferindo a importação de energia elétrica do que a geração nos turbogeradores, fechando os alívios. Observa-se, todavia, que a contabilização dos consumos totais de VB resultaram em valor menor do que nas demais situações e não é possível atribuir este fato à presença de alívios ou ausência da turbina a gás – é mais provável que a presença de alívios, devido a sua natureza instável e à imprecisões na maneira de estimar a vazão a partir da abertura de válvulas, levaram a erros de balanço que por sua vez contabilizam um consumo menor de VB. Estes menores

consumos calculados de VB (que são incorretos) levam, enfim a menores necessidades de geração de vapor. A aplicação do modelo em outros casos com alívio apresentou comportamento semelhante. Desta forma, é sensato não aplicar o modelo para situações onde há alívios de vapor. Isto não limita a aplicação da ferramenta. Na realidade, o fechamento de alívios é uma operação que pode ser conduzida por simples procedimentos operacionais.

## G.5 SITUAÇÃO 5

TABELA 19: Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 10/07/05, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1196.5	1142.3	1139.9	1142.6	-	1139.7
Variação em vazão VS (caldeiras) (%)	-	-11.4%	-11.9%	-11.3%	-	-11.9%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	40.0	25.0	10.0	20.0	-	10.0
Var. vazão em valv. redutoras VS/VA (%)	-	-37.6%	-75.0%	-50.0%	-	-75.0%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	47.6	0.0	10.0	17.0	-	10.0
Var. vazão em valv. redutoras VA/VM (%)	-	-100.0%	-79.0%	-64.3%	-	-79.0%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	97.0	74.0	74.0	74.0	-	74.0
Var. vazão em valv. redutoras VM/VB (%)	-	-23.8%	-23.8%	-23.8%	-	-23.8%
Vazão em alívios de VB (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	54.5	49.8	50.4	50.5	-	50.4
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	46.5	66.1	66.1	66.1	-	66.1
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	57.7	67.5	49.3	46.5	-	49.3
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	3.6	8.8	8.8	8.8	-	8.8
Variação da vazão de extração de VA * (%)	-	-0.9%	2.7%	-0.3%	-	2.7%
Variação da vazão de extração de VM (%)	-	8.3%	11.0%	9.3%	-	11.0%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	223.1	163.0	160.2	164.1	-	160.0
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	717.1	677.9	690.5	683.2	-	690.3
Custo Total (R\$/h)	<b>22708.3</b>	<b>20258.6</b>	<b>20110.9</b>	<b>20308.0</b>	-	<b>20102.6</b>
Redução de custo (%)	-	10.8%	11.4%	10.6%	-	11.5%

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

Este período também apresenta ausência da turbina a gás (em manutenção programada), mas sem a ocorrência de alívios, como pode ser observado na Tabela 19. A importação de energia elétrica é maximizada, tendo em vista o preço mais atrativo e o período avaliado ser fora do horário de ponta. A redução de carga nos turbogeradores

leva a uma redução do consumo de VS de 30 a 40 t.h<sup>-1</sup>, dependendo do caso. É possível observar-se também redução na vazão de condensação nas turbinas de extração-condensação, o que representa um ponto de operação mais eficiente para o sistema termoeletrico. A redução geral de abertura das válvulas reductoras é obtida pelo aumento do uso de turbinas VA/VB e pelo ajuste principalmente nas extrações de VM. É importante verificar também que o comportamento do 22TBC1, na situação pré PGM-2005 não apresenta nas otimizações evolução em relação ao caso real, o que confirma a condição de pouca flexibilidade operacional mencionada anteriormente. No geral, a otimização permite atingir resultados consideráveis, com ganhos acima de 10%, mesmo sem necessidade de novos investimentos ou mudança na condição das vazões mínimas das reductoras, mas apenas com ajustes operacionais nas turbinas de duplo estágio e na seleção correta de acionadores. Uma observação interessante é que a geração real de VS está próxima de 1200 t.h<sup>-1</sup>, e que apresentou, também como no caso de 06/06/05, um maior potencial de redução da geração de VS do que nos casos onde a geração real encontra-se menor do que 1150 t.h<sup>-1</sup> de VS.

## G.6 SITUAÇÃO 6

TABELA 20: Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 14/08/05, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1128.4	1143.9	1141.5	1144.1	1125.2	1116.0
Variação em vazão VS (caldeiras) (%)	-	4.3%	3.6%	4.4%	-2.5%	-5.5%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	13.3	25.0	10.0	20.0	20.0	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VS/VA (%)	-	87.8%	-24.9%	50.2%	50.2%	-24.9%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	17.4	0.0	10.0	17.0	20.0	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VA/VM (%)	-	-100.0%	-42.6%	-2.5%	14.8%	-42.6%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	83.2	69.2	69.2	69.2	69.2	69.2
Var. vazão em válv. redutoras VM/VB (%)	-	-16.9%	-16.9%	-16.9%	-16.9%	-16.9%
Vazão em alívios de VB (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	54.7	52.1	52.4	52.8	53.5	53.1
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	41.9	52.9	52.9	52.9	52.9	52.9
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	54.7	49.3	37.4	25.5	4.5	16.4
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	4.7	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Variação da vazão de extração de VA * (%)	-	-13.0%	-5.4%	-13.8%	-23.3%	-16.6%
Variação da vazão de extração de VM (%)	-	4.9%	5.3%	6.8%	13.0%	12.6%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	170.3	184.5	181.7	185.5	166.7	156.2
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	646.3	650.1	662.7	655.4	636.4	637.3
<b>Custo Total (R\$/h)</b>	<b>20225.7</b>	<b>19228.9</b>	<b>19076.8</b>	<b>19276.7</b>	<b>18608.6</b>	<b>18156.3</b>
Redução de custo (%)	-	4.9%	5.7%	4.7%	8.0%	10.2%

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

Novamente, uma razoável redução do custo total da termoelétrica é obtida, mesmo às custas de incremento da carga de caldeira, conforme observado na Tabela 20. O maior potencial de ganho neste período envolve o gerenciamento das fontes de energia elétrica, sendo mais conveniente reduzir a importação de energia, com elevação de carga dos turbogeradores, mesmo aumentando a vazão de condensação. A redução da demanda de energia elétrica não é expressiva, sendo mais adequado maximizar o uso de VS para geração elétrica nos turbogeradores – observa-se inclusive a baixa utilização de turbinas e a redução das extrações de VA, coerente com a maior geração de energia utilizando condensação nos turbogeradores. Novamente observa-se o dobro dos ganhos quando a operação da turbina a gás produzindo potência até seu limite de projeto do gerador é viabilizada e quando o limite mínimo de geração dos turbogeradores é reduzido.

## G.7 SITUAÇÃO 7

TABELA 21

Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 23/08/05, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1098.6	1100.6	1093.0	1100.4	1087.5	1077.5
Varição em vazão VS (caldeiras) (%)	-	0.6%	-1.5%	0.5%	-4.2%	-7.0%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	13.6	25.0	10.0	20.0	20.0	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VS/VA (%)	-	83.9%	-26.5%	47.1%	47.1%	-26.5%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	35.9	0.0	10.0	17.0	20.0	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VA/VM (%)	-	-100.0%	-72.2%	-52.7%	-44.3%	-72.2%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	32.7	0.0	15.3	17.0	20.2	15.6
Var. vazão em válv. redutoras VM/VB (%)	-	-100.0%	-53.3%	-48.0%	-38.3%	-52.2%
Vazão em alívios de VB (t/h)	49.8	34.5	30.4	29.5	32.9	30.8
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	56.1	51.5	53.8	53.2	53.2	53.8
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	28.7	52.8	29.0	29.0	29.0	29.0
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	20.7	40.2	37.0	40.2	40.2	37.0
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	4.7	0.4	3.7	0.9	0.9	3.7
Varição da vazão de extração de VA * (%)	-	-3.2%	-3.8%	-4.2%	-2.1%	-3.8%
Varição da vazão de extração de VM (%)	-	-6.4%	-6.7%	-6.6%	-6.6%	-6.6%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	193.4	206.8	216.1	213.7	197.8	200.2
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	621.7	612.3	619.7	617.1	604.2	604.2
Custo Total (R\$/h)	<b>19693.1</b>	<b>18184.8</b>	<b>17950.8</b>	<b>18362.4</b>	<b>17940.0</b>	<b>17387.3</b>
Redução de custo (%)	-	7.7%	8.8%	6.8%	8.9%	11.7%

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

Nesta situação que também tem presença de alívios de vapor, o modelo não obteve bons resultados em termos de fechamento de alívio, apesar de haver redução do consumo de potência elétrica e do custo da termelétrica, conforme Tabela 21. Observa-se também uma diferença de 18% no fechamento de balanço no nível de VB. Assim como já mencionado em situação anterior, a planilha de balanço contabilizou um consumo de VB menor que os demais casos pela imprecisão relativa à maneira como é calculada a vazão de alívio. Desta forma, como o consumo fixo de VB é menor do que o real, há excedente de VM que após passar por válvulas redutoras deve ser aliviado. O caso 3 no entanto apresenta um comportamento diferente, com uma das raras utilizações da bomba turbinada de água de combate a incêndio (alimentação em VM e saída para atmosfera).

Da mesma forma, reitera-se a recomendação de primeiro buscar o fechamento do alívio e, após estabilidade da planta, aplicar o modelo de otimização para buscar melhorias.

## G.8 SITUAÇÃO 8

TABELA 22: Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 17/09/05, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1139.4	1154.5	1152.7	1155.1	1135.0	1125.2
Varição em vazão VS (caldeiras) (%)	-	3.9%	3.4%	4.1%	-2.7%	-5.8%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	11.5	25.0	10.0	20.0	20.0	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VS/VA (%)	-	116.6%	-13.4%	73.3%	73.3%	-13.4%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	46.2	0.0	10.0	17.0	20.0	12.7
Var. vazão em válv. redutoras VA/VM (%)	-	-100.0%	-78.4%	-63.2%	-56.7%	-72.6%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	104.9	82.2	82.2	82.2	82.2	82.2
Var. vazão em válv. redutoras VM/VB (%)	-	-21.6%	-21.6%	-21.6%	-21.6%	-21.6%
Vazão em alívios de VB (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	56.1	52.5	52.9	53.0	53.7	53.7
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	41.7	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	38.5	39.7	27.8	25.0	4.0	4.0
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	4.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
Varição da vazão de extração de VA * (%)	-	-13.1%	-7.6%	-10.1%	-17.1%	-15.7%
Varição da vazão de extração de VM (%)	-	8.7%	9.1%	7.5%	13.8%	16.6%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	153.6	164.9	162.7	166.3	146.4	135.4
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	693.7	695.2	708.5	700.9	680.7	681.0
<b>Custo Total (R\$/h)</b>	<b>23304.9</b>	<b>20834.9</b>	<b>20703.8</b>	<b>20900.2</b>	<b>20091.0</b>	<b>19594.1</b>
Redução de custo (%)	-	10.6%	11.2%	10.3%	13.8%	15.9%

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

A situação ocorre durante o horário de ponta. Desta forma, as otimizações buscam eliminar a importação de energia elétrica, ocorrida no caso real – a justificativa desta estratégia é evidenciada pelo custo da energia elétrica em setembro, o maior entre os meses avaliados, além da necessidade de pagamento da tarifa para consumo na ponta - e reduzir a demanda de energia elétrica, pelo uso mais racional de turbinas a vapor. Para esta condição, mesmo uma produção de VS cerca de 4% maior e uma maior vazão de condensação que no caso real é admitida, levando a economias maiores do que 10% no custo da central termelétrica, conforme Tabela 22.

## G.9 SITUAÇÃO 9

TABELA 23: Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 19/09/05, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1138.5	1140.4	1138.1	1140.7	1117.8	1109.0
Variação em vazão VS (caldeiras) (%)	-	0.5%	-0.1%	0.6%	-7.2%	-9.8%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	13.3	25.0	10.0	20.0	20.0	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VS/VA (%)	-	87.6%	-25.0%	50.1%	50.1%	-25.0%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	43.8	0.0	10.0	17.0	20.0	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VA/VM (%)	-	-100.0%	-77.2%	-61.2%	-54.3%	-77.2%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	92.5	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
Var. vazão em válv. redutoras VM/VB (%)	-	-24.3%	-24.3%	-24.3%	-24.3%	-24.3%
Vazão em alívios de VB (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	57.2	53.2	53.5	53.9	54.6	54.0
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	28.5	52.8	52.8	52.8	52.8	52.8
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	54.8	46.5	37.4	25.5	4.5	20.7
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	9.0	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Variação da vazão de extração de VA * (%)	-	-16.7%	-9.6%	-16.1%	-23.6%	-16.6%
Variação da vazão de extração de VM (%)	-	7.1%	6.6%	8.1%	14.4%	12.5%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	167.8	178.1	175.4	179.2	156.5	146.3
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	691.9	682.1	694.8	687.4	664.5	665.7
<b>Custo Total (R\$/h)</b>	<b>21690.9</b>	<b>20064.7</b>	<b>19909.8</b>	<b>20116.6</b>	<b>19199.2</b>	<b>18723.6</b>
Redução de custo (%)	-	7.5%	8.2%	7.3%	11.5%	13.7%

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

As otimizações neste período, também afetado pelos preços de compra de energia de setembro, buscam reduzir a demanda e minimizar a importação de energia elétrica, conforme Tabela 23. A redução do uso de válvulas redutoras e turbinas VA/VM permite que se trabalhe com mais turbinas VA/VB mesmo considerando uma redução no total de extrações de VA nas turbinas de duplo estágio. Por sua vez, um pequeno aumento nas extrações de VM permite manter o suprimento de vapor de média pressão que foi suprimido pela restrição na abertura das válvulas redutoras VA/VM. Com esta estratégia, as rotinas de otimização garantem um ganho de 7 a 8% com ajustes operacionais (que pouco alteram a carga de caldeiras) e de até 13,7% com alterações nos limites das gerações internas de energia elétrica (que causam também reduções significativas na produção de vapor de caldeiras).

## G.10 SITUAÇÃO 10

TABELA 24: Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 20/09/05, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1139.9	1140.0	1138.0	1140.4	1128.1	1118.4
Varição em vazão VS (caldeiras) (%)	-	0.0%	-0.5%	0.1%	-4.1%	-7.1%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	12.9	25.0	10.0	20.0	20.0	10.0
Var. vazão em valv. redutoras VS/VA (%)	-	93.7%	-22.5%	55.0%	55.0%	-22.5%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	51.6	0.0	10.0	17.0	20.0	13.5
Var. vazão em valv. redutoras VA/VM (%)	-	-100.0%	-80.6%	-67.1%	-61.2%	-73.8%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	94.7	59.1	59.1	59.1	59.1	59.1
Var. vazão em valv. redutoras VM/VB (%)	-	-37.6%	-37.6%	-37.6%	-37.6%	-37.6%
Vazão em alvíos de VB (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	55.3	50.4	50.8	51.0	51.7	51.7
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	28.0	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	54.7	41.7	32.6	25.5	4.5	4.5
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	9.0	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Varição da vazão de extração de VA * (%)	-	-14.7%	-8.3%	-12.4%	-19.1%	-17.5%
Varição da vazão de extração de VM (%)	-	7.0%	6.5%	6.4%	12.6%	15.1%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	151.5	158.6	156.1	159.7	147.7	136.8
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	702.3	690.3	703.3	695.7	683.4	683.7
Custo Total (R\$/h)	<b>21927.4</b>	<b>19905.6</b>	<b>19762.3</b>	<b>19957.9</b>	<b>19475.9</b>	<b>18982.5</b>
Redução de custo (%)	-	9.2%	9.9%	9.0%	11.2%	13.4%

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

As otimizações permitem obter consideráveis ganhos em custo através da redução da demanda de energia elétrica e restrição de válvulas redutoras através da seleção adequada de acionadores. A compra de energia é minimizada, devido altos preços de setembro. Apesar de praticamente não haver alteração na carga de caldeira para os primeiros três casos, conforme Tabela 24, é possível obter-se uma economia média superior a 9% em ajuste nas condições operacionais. Há incrementos de ganho em custo que ainda são possíveis com ampliação do limite de geração elétrica na turbina a gás e reduzir do limite de geração nos turbogeradores a vapor.

## G.11 SITUAÇÃO 11

TABELA 25: Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 03/10/05, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1152.9	1144.4	1140.9	1142.9	1142.0	1132.7
Varição em vazão VS (caldeiras) (%)	-	-2.3%	-3.2%	-2.7%	-4.6%	-7.6%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	46.9	25.0	10.0	20.0	20.0	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VS/VA (%)	-	-46.7%	-78.7%	-57.4%	-57.4%	-78.7%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	44.6	0.0	10.0	17.0	20.0	10.4
Var. vazão em válv. redutoras VA/VM (%)	-	-100.0%	-77.6%	-61.9%	-55.1%	-76.8%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	65.5	56.1	56.1	56.1	56.1	56.1
Var. vazão em válv. redutoras VM/VB (%)	-	-14.3%	-14.3%	-14.3%	-14.3%	-14.3%
Vazão em alvíos de VB (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	56.2	53.0	53.3	53.4	54.0	53.7
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	42.0	53.0	53.0	53.0	53.0	53.0
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	50.3	69.3	60.2	57.4	39.2	48.3
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	4.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
Varição da vazão de extração de VA * (%)	-	6.0%	17.3%	13.0%	2.9%	9.6%
Varição da vazão de extração de VM (%)	-	6.1%	5.6%	4.0%	9.1%	9.5%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	183.8	170.2	166.1	169.4	168.6	158.0
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	630.4	643.8	655.2	647.3	646.3	647.0
<b>Custo Total (R\$/h)</b>	<b>19825.5</b>	<b>18862.7</b>	<b>18682.3</b>	<b>18860.4</b>	<b>18532.1</b>	<b>18067.7</b>
Redução de custo (%)	-	4.9%	5.8%	4.9%	6.5%	8.9%

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

Neste período, basicamente manteve-se a configuração de suprimento de energia elétrica, com a redução ocorrida na importação basicamente devido à redução da demanda pela substituição de motores por turbinas VA/VB. O uso de condensação caiu em benefício de aumentos de extração de VA e VM – apesar de um maior consumo de VS para manter a carga das turbinas, obtém-se uma redução em média de 3% na geração de VS, conforme Tabela 25. Em todos os grupos de válvulas redutoras houve redução de abertura, obtendo-se uma economia média acima de 5% no custo da central termoeletrica.

## G.12 SITUAÇÃO 12

TABELA 26: Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 09/02/06, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1141.7	1127.6	1125.4	1126.3	1126.6	1117.8
Varição em vazão VS (caldeiras) (%)	-	-3.9%	-4.5%	-4.3%	-6.4%	-9.0%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	47.6	25.0	10.0	20.0	20.0	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VS/VA (%)	-	-47.5%	-79.0%	-58.0%	-58.0%	-79.0%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	12.7	0.0	10.0	17.0	20.0	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VA/VM (%)	-	-100.0%	-21.1%	34.2%	57.8%	-21.1%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	78.4	56.6	56.6	66.2	66.2	56.6
Var. vazão em válv. redutoras VM/VB (%)	-	-27.7%	-27.7%	-15.5%	-15.5%	-27.7%
Vazão em alvíos de VB (t/h)	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	58.8	55.0	55.0	55.7	55.7	55.0
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	29.6	52.6	52.6	42.3	42.3	52.6
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	20.7	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	5.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Varição da vazão de extração de VA * (%)	-	19.4%	46.4%	31.9%	35.0%	46.4%
Varição da vazão de extração de VM (%)	-	1.1%	-1.9%	-1.3%	-2.2%	-1.9%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	179.4	165.0	162.4	165.2	165.7	154.8
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	631.3	639.8	652.7	643.6	643.9	645.0
<b>Custo Total (R\$/h)</b>	<b>19513.9</b>	<b>18392.2</b>	<b>18240.1</b>	<b>18482.5</b>	<b>18275.5</b>	<b>17734.9</b>
Redução de custo (%)	-	5.7%	6.5%	5.3%	6.3%	9.1%

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

Este é a primeira situação avaliada após as modificações em turbinas e partida do novo forno de craqueamento da Unidade de Processo 2. Foi possível obter-se uma redução de cerca de 3 MW em consumo elétrico, o que permitiu uma menor geração nos turbogeradores e na importação de energia elétrica, basicamente por substituição de motores por turbinas VA/VB, conforme Tabela 26. A redução de vazão de vapor pelas redutoras VS/VA foi compensada pelo aumento de extração de VA para garantir o suprimento para as turbinas VA/VB colocadas em operação – o que é confirmado pela menor utilização de condensação. Dentro da curva de eficiência das turbinas de duplo estágio, isto significou um aumento do consumo de VS. A demanda total de VS, no entanto, foi reduzida em cerca de 4 % nos casos estudados, principalmente pela redução dos consumos na redutora VS/VA. Como resultado da estratégia, garante-se reduções no custo da termoeletrica maiores do que 5%.

## G.13 SITUAÇÃO 13

TABELA 27: Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 21/02/06, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1177.1	1170.5	1171.9	1170.8	1170.5	1168.2
Variação em vazão VS (caldeiras) (%)	-	-1.8%	-1.4%	-1.7%	-4.1%	-4.8%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	39.2	25.0	10.0	20.0	20.0	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VS/VA (%)	-	-36.1%	-74.5%	-48.9%	-48.9%	-74.5%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	73.8	0.9	12.3	18.1	22.4	12.3
Var. vazão em válv. redutoras VA/VM (%)	-	-98.8%	-83.4%	-75.5%	-69.7%	-83.4%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	99.8	81.4	83.1	83.1	83.1	83.1
Var. vazão em válv. redutoras VM/VB (%)	-	-18.4%	-16.7%	-16.7%	-16.7%	-16.7%
Vazão em alvíos de VB (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	56.5	51.6	51.0	51.5	51.7	51.0
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	30.1	53.2	53.6	53.6	53.6	53.6
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	47.1	67.5	83.7	67.5	62.7	83.7
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	6.9	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Variação da vazão de extração de VA * (%)	-	-10.6%	16.7%	4.9%	4.6%	16.7%
Variação da vazão de extração de VM (%)	-	7.6%	2.1%	4.9%	5.0%	2.1%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	113.6	109.0	100.6	100.6	100.6	96.9
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	641.3	644.4	665.2	654.1	653.9	661.6
<b>Custo Total (R\$/h)</b>	<b>20303.6</b>	<b>19276.5</b>	<b>19277.4</b>	<b>19335.6</b>	<b>19106.7</b>	<b>18910.7</b>
Redução de custo (%)	-	5.1%	5.1%	4.8%	5.9%	6.9%

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

Esta condição também foi avaliada após as modificações em turbinas e após a entrada em operação do oitavo forno de craqueamento da unidade de Processo 2, caracterizado ainda pela ausência de um dos turbogeradores a vapor, indisponível devido a manutenção programada de duração de três meses. Também observa-se a operação com 3 caldeiras. A redução expressiva de quase 5 MW permite redução da importação de energia. É interessante verificar que mesmo prescindindo de um dos turbogeradores que operam com ciclo condensante em um dos estágios, ainda assim foi possível reduzir-se cerca de 13 t.h<sup>-1</sup> em uso de condensação, conforme Tabela 27.

## G.14 SITUAÇÃO 14

TABELA 28: Sumário de resultados dos cinco casos avaliados para a configuração de 23/02/06, para comparação com a situação real

	Situação					
	ATUAL	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Geração Total de VS (t/h)	1185.5	1191.9	1192.1	1191.0	1190.7	1188.4
Varição em vazão VS (caldeiras) (%)	-	1.6%	1.6%	1.3%	-0.8%	-1.4%
Vazão em válv. redutoras VS/VA (t/h)	45.8	25.0	10.0	20.0	20.0	10.0
Var. vazão em válv. redutoras VS/VA (%)	-	-45.4%	-78.2%	-56.3%	-56.3%	-78.2%
Vazão em válvulas redutoras VA/VM (t/h)	40.6	0.0	12.2	18.0	22.3	12.2
Var. vazão em válv. redutoras VA/VM (%)	-	-100.0%	-70.0%	-55.7%	-45.0%	-70.0%
Vazão em válvulas redutoras VM/VB (t/h)	84.1	80.2	80.2	80.2	80.2	80.2
Var. vazão em válv. redutoras VM/VB (%)	-	-4.6%	-4.6%	-4.6%	-4.6%	-4.6%
Vazão em alvíos de VB (t/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Demanda Total de Energia Elétrica (MW)	55.9	51.9	51.9	52.5	52.6	51.9
Vapor em turbinas VA/VB cambiáveis (t/h)	43.6	53.4	53.4	53.4	53.4	53.4
Vapor em turbinas VA/VM cambiáveis (t/h)	25.5	62.7	62.7	46.5	41.7	62.7
Vapor em turbinas VM/VB cambiáveis (t/h)	6.9	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
Varição da vazão de extração de VA * (%)	-	17.9%	35.7%	22.4%	22.1%	35.7%
Varição da vazão de extração de VM (%)	-	-0.8%	-4.2%	-1.6%	-1.5%	-4.2%
CV em turbinas de dois estágios * (t/h)	119.8	121.3	121.2	121.2	121.2	117.5
VS em turbinas de dois estágios * (t/h)	652.7	679.9	695.1	684.0	683.7	691.4
<b>Custo Total (R\$/h)</b>	<b>22007.5</b>	<b>21808.7</b>	<b>21768.9</b>	<b>21827.0</b>	<b>21598.2</b>	<b>21402.2</b>
Redução de custo (%)	-	0.9%	1.1%	0.8%	1.9%	2.8%

\* Nota: exceto as turbinas dos compressores de gás craqueado da planta de processo 1, sem variáveis manipuláveis no trabalho atual.

O último caso avaliado também envolveu a ausência de um turbogerador, sendo que tal cenário encontra-se próximo do custo mínimo. Ainda assim, os maiores ganhos estão relacionados à redução de uso de válvulas redutoras e do consumo elétrico. Há um pequeno aumento na geração de VS, sendo a menor vazão pelas redutoras VS/VA compensada pelo maior consumo de VS nas turbinas de duplo estágio, para atender principalmente uma maior extração de VA. Isto permite que haja suprimento para as turbinas VA/VB que substituirão motores elétricos, causando redução do consumo elétrico, conforme Tabela 28.