

Mestrado Integrado em Engenharia Química

Previsão do impacto energético da reformulação da Refinaria do Porto da Petrogal

Tese de Mestrado

desenvolvida no âmbito da disciplina de

Projecto de Desenvolvimento em Ambiente Empresarial

Eduardo Filipe Miranda de Oliveira

Petrogal SA



Departamento de Engenharia Química

Orientador na FEUP: Prof. Fernando Gomes Martins

Orientador na empresa: Eng.º Manuel Leão Tavares

Julho de 2008

À minha mãe.

Agradecimentos

A realização desta tese não teria sido possível sem a contribuição de um inúmero conjunto de pessoas a quem gostaria de prestar os meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor Fernando Gomes Martins um agradecimento especial por todo o seu empenho, dedicação e prontidão na resolução dos obstáculos surgidos durante o decorrer da tese e pela orientação do trabalho.

Um agradecimento ao Engenheiro Manuel Leão Tavares pela informação disponibilizada, orientação e apoio prestado durante o trabalho.

À Engenheira Ana Feliciano, um agradecimento pela disponibilidade e pela ajuda no início da realização desta tese.

À Engenheira Marta Cruz, Engenheiro Luís Rodrigues, Engenheira Andreia Costa, Engenheiro Fernando Borges, Engenheiro Pedro André, Engenheira Ana Rita Marques e Engenheiro Sérgio Moutinho o meu agradecimento por toda a sua disponibilidade e ajuda na listagem de equipamento, bem como no esclarecimento de algumas dúvidas.

Gostaria de agradecer ao Sr. Mário Cerqueira e ao Sr. Aly Said Aly do Arquivo da Refinaria por toda a ajuda prestada na recolha das folhas de dados de equipamentos.

Um agradecimento à Refinaria do Porto da Petrogal pela oportunidade de realização deste estágio curricular.

Por fim, uma nota especial para o meu grande amigo e companheiro neste estágio, Vasco Santos por todos os bons momentos de companheirismo e entreaajuda vividos ao longo deste trabalho.

Resumo

A Refinaria do Porto da Petrogal é uma empresa que opera no sector da refinação e que apresenta preocupações ao nível da eficiência energética e dos respectivos impactos ambientais. Em 2005, esta empresa encomendou um estudo energético à KBC Process Technology Ltd. Este estudo consistiu no desenvolvimento de um modelo energético do seu sistema de vapor, com recurso à aplicação informática ProSteam. O modelo foi já parcialmente validado e actualizado no âmbito de um trabalho anterior.

Esta tese teve como objectivos a conclusão da validação e actualização do modelo energético e a previsão do impacto energético das futuras unidades a instalar na Refinaria do Porto da Petrogal, Cogeração, Destilação sob Vácuo e Viscorredução. Os novos modelos desenvolvidos permitiram avaliar o impacto energético destas unidades na eficiência energética global do sistema de vapor.

Os resultados obtidos pelos modelos mostram que a introdução das três novas unidades apresenta um impacto energético positivo (aumento de eficiência) em comparação com o actual sistema de vapor, reflectindo-se numa redução dos custos de operação. A introdução das futuras unidades de Destilação sob Vácuo e Viscorredução apresenta um impacto energético positivo relativamente ao modelo que engloba a Cogeração. No entanto, os custos de operação aumentam devido ao acréscimo no consumo de Fuel-gás por parte destas unidades.

Palavras Chave (Tema): Refinação, Energia, Eficiência energética, Modelos energéticos, ProSteam.

Abstract

Petrogal's Oporto Refinery is a company that operates in the refining sector and is concerned about energy efficiency and its environmental impacts. In 2005, the company ordered an energy study to KBC Process Technology Ltd, which consisted in the development of an energy model of the steam system, using the ProSteam software. The model has already been incompletely validated and updated in a previous work.

The main objectives of this thesis were to complete the validation and updating of the energy model and to predict the energy impact of the new units to be built at Petrogal's Oporto Refinery. These units are: Cogeneration, Vacuum Distillation and Visbreaker. The new developed models allowed the evaluation of the energy impact of these units in the overall steam system energy efficiency.

The results obtained by the models show that the introduction of the three new units presents a positive energy impact (increase of efficiency), and a decrease of operating costs, when compared with the present steam system. The introduction of the new units, Vacuum Distillation and Visbreaker, has a positive energy impact when compared with model that includes Cogeneration. However, the operating costs increases due to higher fuel gas consumption by these units.

Keywords:

Refining, Energy, Energy efficiency, Energetic models, ProSteam.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projecto.....	1
1.2	Contributos do Trabalho.....	2
1.3	Organização da Tese	2
2	Estado da Arte	4
3	Descrição Técnica e Discussão dos Resultados	6
3.1	Aquisição de conhecimentos em ProSteam e sobre o modelo energético desenvolvido para a RPP	6
3.2	Estudo da folha de cálculo “Drivers”	9
3.3	Desenvolvimento da folha de cálculo “Drivers Efficiency”	9
3.4	Alteração e actualização da folha “Drivers”.....	12
3.5	Estudo detalhado e alteração da folha “Utils PFD”	15
3.6	Detecção e correcção de falhas na folha de cálculo “Misc Calcs”	16
3.7	Finalização da actualização do modelo energético.....	17
3.8	Previsão do impacto energético de algumas modificações na folha “Drivers”...	19
3.9	Previsão do impacto energético da futura unidade de Cogeração	21
3.10	Previsão do impacto energético das futuras unidades de Destilação sob Vácuo e Viscorredução	24
3.11	Previsão do impacto energético das futuras unidades de Cogeração, Destilação sob Vácuo e Viscorredução	28
4	Conclusões	30
5	Avaliação do trabalho realizado.....	31
5.1	Objectivos Realizados.....	31
5.2	Trabalho Futuro	31
5.3	Apreciação final	31
Anexo 1	Metodologia para o cálculo da eficiência de turbinas a vapor.....	34
Anexo 2	Determinação da curva de consumo de vapor de uma turbina a vapor	37

Anexo 3	Ajuste de uma curva de potência de uma bomba centrífuga.....	39
Anexo 4	Metodologia de cálculo utilizada no desenvolvimento da folha de cálculo “Cogeneration”	41
4.1	Cálculo do consumo total anual de combustível	41
4.2	Cálculo da potência eléctrica fornecida para a RPP e para a REN.....	45
4.3	Cálculo da eficiência energética global da unidade de Cogeração	45
4.4	Cálculo do vapor produzido, combustível consumido e energia eléctrica fornecida para a RPP e REN na base anual.....	46

Índice de Figuras

<i>Figura 1 - Excerto da folha de cálculo “Drivers Efficiency”. a) Dados introduzidos, b) Parâmetros calculados.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2 - Excerto da folha “Drivers”, a) Antes da alteração e actualização, b) Depois da alteração e actualização.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3 - Folha “Utils PFD” relativa às bombas P-4001 A-E/J, a) Antes da alteração, b) Depois da alteração.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4 - Parte da folha “Misc Calcs” relativa ao cálculo de diversos parâmetros relacionados com os combustíveis.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5 - Célula relativa ao cálculo do poder calorífico inferior (LHV) para o Fuelóleo (FO), a) Antes da alteração e b) Depois da alteração.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6 - Excerto da folha “Cost Summary” relativo à a) Potência eléctrica e b) Eficiência energética global do sistema de vapor.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7 - Parte da folha “Cogeneration” relativa à, a) Produção de potência eléctrica, b) Produção de vapor de alta pressão.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8 - Parte da folha “Producers” relativa aos equipamentos das unidades de Destilação sob Vácuo (U-10000) e Viscosredução (U-10100).</i>	<i>25</i>
<i>Figura 9 - Parte da folha “Consumers” relativa aos equipamentos das unidades de Destilação sob Vácuo (U-10000) e Viscosredução (U-10100).</i>	<i>25</i>
<i>Figura 10 - Modelo de simulação do circuito de vapor e condensados das unidades de Destilação sob Vácuo (U-10000) e Viscosredução (U-10100).</i>	<i>26</i>
<i>Figura A2.1 - Curva de consumo de vapor da turbina PT-4002 A.</i>	<i>37</i>
<i>Figura A2.2 - Equação de interpolação da curva de consumo de vapor da turbina PT-4002 A.</i>	<i>38</i>
<i>Figura A3.1 - Curva de potência da bomba P-4101 F para uma velocidade de rotação de 2900 rpm.</i>	<i>39</i>
<i>Figura A3.2 - Curva de potência da bomba P-4101 F para a condição final pretendida e respectiva equação de ajuste.</i>	<i>40</i>
<i>Figura A4.1 - Esquema das correntes de entrada e de saída de uma caldeira de recuperação de calor.</i>	<i>42</i>

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 - Comparação entre a eficiência prevista pela KBC e a eficiência obtida através da folha “Drivers Efficiency” para algumas turbinas.</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 2 - Comparação entre o caudal mássico de vapor previsto pela KBC e o valor proveniente das folhas de dados para algumas turbinas.</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 3 - Resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético.</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 4 - Resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético para as 3 turbinas estudadas.</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 5 - Principais resultados obtidos para a unidade de Cogeração.</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 6 - Resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético que inclui a unidade de Cogeração.</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 7 - Resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético que inclui a unidade de Cogeração, Destilação sob vácuo e Viscorredução.</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 8 - Resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético para os três modelos desenvolvidos.</i>	<i>28</i>

Notação e Glossário

$(\Delta H)_S$	Varição de entalpia isentrópica	$J.kg^{-1}$
EE_{REN}	Energia eléctrica anual fornecida para a REN	$W.s$
EE_{RPP}	Energia eléctrica anual fornecida para a RPP	$W.s$
H'_2	Entalpia isentrópica para as condições de saída	$J.kg^{-1}$
$H_{Água}$	Entalpia da água de alimentação às <i>HRSG</i>	$J.kg^{-1}$
$H_{Blowdown}$	Entalpia da corrente de <i>blowdown</i> das <i>HRSG</i>	$J.kg^{-1}$
H_i	Entalpia nas condições <i>i</i>	$J.kg^{-1}$
H^l	Entalpia de líquido saturado	$J.kg^{-1}$
H^v	Entalpia de vapor saturado	$J.kg^{-1}$
H_{Vapor}	Entalpia da corrente de vapor das <i>HRSG</i>	$J.kg^{-1}$
$\dot{m}_{Água}$	Caudal mássico de água de alimentação às <i>HRSG</i>	$kg.s^{-1}$
$\dot{m}_{Blowdown}$	Caudal de <i>blowdown</i> das <i>HRSG</i>	$kg.s^{-1}$
M_C	Peso molecular do combustível	$kg.mol^{-1}$
\dot{m}_C	Caudal mássico de combustível consumido em ambas as turbinas a gás	$kg.s^{-1}$
$\dot{m}_{C,total}$	Caudal mássico total de combustível consumido	$kg.s^{-1}$
$\dot{m}_{Défice}$	Caudal mássico de combustível consumido na queima suplementar	$kg.s^{-1}$
\dot{m}_{TV}	Caudal mássico de vapor consumido pela turbina a vapor	$kg.s^{-1}$
\dot{m}_{Vapor}	Caudal mássico de vapor necessário para a RPP	$kg.s^{-1}$
$\dot{m}_{Vapor,anual}$	Caudal mássico de vapor produzido anualmente pela unidade de Cogeração	$kg.s^{-1}$
PCI_C	Poder calorífico inferior do combustível	$J.kg^{-1}$
$P_{Consumida,Cogeração}$	Potência eléctrica consumida pela unidade de Cogeração	W
P_i	Pressão nas condições <i>i</i>	Pa
P_{Local}	Necessidade local de potência eléctrica	W
P_{REN}	Potência eléctrica fornecida para a REN	W
P_{RPP}	Potência eléctrica fornecida para a RPP	W
$P_{TG-4003}$	Potência eléctrica produzida pelo Turbogruppo TG-4003	W
Q	Calor necessário para produzir o caudal mássico de vapor necessário	W
Q_C	Energia contida no combustível associada à queima suplementar	W
$Q_{Défice}$	Défice de calor associado à queima suplementar	W
Q_{Ex}	Calor disponível para transferência de calor nas <i>HRSG</i>	W
Q_{HRSG}	Calor transferido para a água de alimentação às <i>HRSG</i>	W
S'_2	Entropia isentrópica nas condições de saída	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
S_i	Entropia nas condições <i>i</i>	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
S^l	Entropia de líquido saturado	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
SSC	Consumo específico de vapor da turbina	$kg.W^{-1}.s^{-1}$

S^v	Entropia de vapor saturado	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
T_i	Temperatura nas condições i	K
$t_{Laboração,anual}$	Período anual de laboração	$s.ano^{-1}$
$V_{C,défice}$	Volume anual de combustível consumido na queima suplementar pelas <i>HRSG</i> nas condições PTN	Nm^3
$V_{C,TG}$	Volume anual de combustível consumido por ambas as turbinas a gás nas condições PTN	Nm^3
$V_{C,total}$	Volume anual total de combustível consumido pela unidade de Cogeração nas condições PTN	Nm^3
V_M	Volume molar de um gás nas condições PTN	Nm^3
W_C	Energia contida no combustível expressa em unidades de potência	W
W_S	Trabalho real da turbina a vapor	W
W_{TG}	Potência eléctrica da turbina a gás	W
x_2'	Qualidade isentrópica para as condições de saída	
$x_{Blowdown}$	Fracção mássica de <i>blowdown</i>	
x^v	Qualidade	

Letras gregas

$\eta_{Cogeração}$	Eficiência energética da unidade de Cogeração
η_{HRSG}	Eficiência energética das caldeiras de recuperação de calor
η_{TG}	Eficiência eléctrica da turbina a gás
η_{TV}	Eficiência da turbina a vapor

Índices

i	índice ou contador
-----	--------------------

Lista de Siglas

RPP	Refinaria do Porto da Petrogal
REN	Rede Eléctrica Nacional
KBC	KBC Process Technology Ltd
HRSG	Caldeiras de recuperação de calor
FUT	Fábrica de Utilidades
FOC	Fábrica de Combustíveis
FOB	Fábrica de Óleos Base
FAR	Fábrica de Aromáticos

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projecto

A energia é cada vez mais um bem de extrema importância para o sector industrial. A sua utilização deverá ser sempre a mais eficiente possível, de forma a diminuir os seus custos e respectivos impactos ambientais, aumentando a rentabilidade e competitividade do sector industrial. Por outro lado as normas legislativas, económicas e ambientais estão a tornar-se imperativas para este sector, no sentido de otimizar a utilização de combustível e energia eléctrica, minimizando as emissões relacionadas com o uso dos combustíveis.

A indústria química utiliza cerca de 12 % da energia total consumida pelo sector industrial na Europa. Em 2005, cerca de 67,8 % dessa energia foi relativa ao sector petroquímico e de refinação. (Capros et al., 2008). No sector de refinação, os custos relativos à energia representaram cerca de 50% dos custos totais de operação nos Estados Unidos em 2004 (Worrell e Galitsky, 2005). Por outro lado o uso da energia na indústria da refinação é responsável por uma grande parte das emissões de poluentes, tornando desta forma as melhorias em termos de eficiência energética bastante atractivas de modo a reduzir as emissões e consequentemente os custos de operação.

Apresentando-se a Refinaria do Porto da Petrogal (RPP), como uma empresa do sector da refinação e com preocupações ao nível da eficiência energética e dos impactos ambientais provenientes da sua laboração, em 2005, esta encomendou um estudo energético à empresa KBC Process Technology Ltd (KBC). Este estudo foi desenvolvido com recurso à aplicação informática ProSteam, criando desta forma um modelo energético do sistema de vapor da RPP. O ProSteam permite modelizar sistemas de produção de energia eléctrica e vapor, apresentando-se útil na redução de custos de capital e operacionais de um sistema de utilidades, optimizando o projecto e as condições de operação desse sistema. No entanto o modelo energético desenvolvido apresentava-se desactualizado, tendo sido alvo de uma parcial validação e actualização durante o Mestrado Integrado em Engenharia Química realizado nesta empresa no primeiro semestre de 2007/2008 (Feliciano, 2008).

Este projecto surge na sequência do trabalho já efectuado e um dos seus objectivos versou sobre a conclusão da validação e actualização do modelo energético.

No seguimento das políticas de eficiência energética e preocupações com o meio ambiente, a RPP irá construir uma futura unidade de Cogeração. Esta unidade irá permitir aumentar a eficiência energética, melhorar a fiabilidade do abastecimento energético e reduzir as emissões de dióxido de carbono. De forma a aumentar a complexidade do aparelho refinador,

a RPP irá construir duas novas unidades, Destilação sob Vácuo e Viscorredução. A primeira terá como objectivo a obtenção de gasóleo de vácuo que será enviado para a Refinaria de Sines. A segunda será destinada ao craqueamento térmico suave do resíduo de vácuo resultante da Destilação sob Vácuo, contribuindo para aumentar a produção de gasóleos e naftas (Galp Energia, 2008). Neste sentido o segundo objectivo deste trabalho relacionou-se com a previsão do impacto energético das novas unidades a instalar na RPP, Cogeração, Destilação sob Vácuo e Viscorredução.

1.2 Contributos do Trabalho

A realização desta tese permitiu a aquisição de um vasto conhecimento sobre o modelo energético desenvolvido, que proporcionou a detecção e correcção de falhas tal como a respectiva actualização do modelo. Originando desta forma um modelo validado para as condições de projecto. Permitindo assim dotar a RPP de um maior conhecimento sobre o funcionamento do modelo desenvolvido, tal como de um modelo energético validado e actualizado. Este modelo constitui uma ferramenta importante na avaliação de diferentes cenários de operação e de futuros investimentos.

Utilizando como base o modelo validado e actualizado, desenvolveu-se a partir deste, dois modelos energéticos de forma a prever o impacto energético das futuras unidades de Cogeração, Destilação sob Vácuo e Viscorredução. Deste modo a RPP possui agora dois modelos energéticos que permitem prever a realidade energética futura, com a introdução das novas unidades.

1.3 Organização da Tese

A presente tese encontra-se dividida em 5 capítulos.

O Capítulo 1 diz respeito à Introdução, onde é descrita a importância da energia e dos modelos energéticos no sector da refinação, enquadrando desta forma o problema em estudo tal como os objectivos propostos.

O Capítulo 2 refere-se ao Estado da Arte, onde se apresenta a temática dos modelos energéticos e as suas potencialidades no melhoramento da eficiência energética de refinarias, mencionando a aplicação usada nesta tese.

A Descrição Técnica e Discussão dos Resultados apresenta-se no Capítulo 3. Nele são descritos todas as alterações efectuadas ao modelo energético, bem como os dois modelos energéticos desenvolvidos e as respectivas folhas de cálculo.

No Capítulo 4 apresentam-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido, realçando o impacto energético das novas unidades na actual situação energética da RPP.

Por último, no Capítulo 5 são apresentados os objectivos do trabalho, o respectivo grau de realização dos mesmos, o trabalho futuro e ainda uma apreciação final sobre todo o trabalho desenvolvido.

2 Estado da Arte

Na actual conjuntura de aumento dos preços da energia e constante aumento das pressões ambientais relativas às emissões, refinarias de todo o mundo continuam a concentrar esforços na optimização dos seus consumos energéticos (Knight, 2008). A melhor forma para melhorar a eficiência energética destas indústrias reside numa análise detalhada do projecto e operação do seu sistema de vapor. A construção de modelos de sistemas de vapor proporciona uma clara compreensão do sistema, bem como das suas limitações operacionais. De uma forma geral estes permitem, calcular o custo real do vapor para diferentes condições operacionais, identificar perdas energéticas, avaliar com precisão projectos de melhoramento energético entre outros (Eastwood, 2002). Os modelos desenvolvidos podem ainda ser ligados ao sistema de controlo distribuído, de forma a obter dados em tempo real, permitindo desta forma obter uma ferramenta eficaz de optimização.

Os modelos de sistemas de vapor têm sido largamente utilizados por refinarias em todo o mundo. A refinaria de Tarragona da Repsol YPF, que apresenta um complexo sistema de vapor é um exemplo dessa utilização (Massa et al., 2006). Nesta refinaria foi implementado um modelo para o sistema de vapor ligado ao sistema de controlo distribuído, permitindo monitorizar a produção e utilização de vapor, optimizar a produção de vapor, combustível e potência eléctrica de forma a reduzir os custos e efectuar avaliações com dados continuamente actualizados. A implementação deste modelo energético nesta refinaria da Repsol YPF permitiu reduzir os custos de operação em mais de 4%, levando esta empresa a aplicar modelos deste tipo em outras refinarias.

Os modelos de sistemas de vapor poderão apresentar diferentes graus de complexidade. Os modelos mais simples correspondem na maioria dos casos a folhas de cálculo onde são efectuados os balanços de massa e os respectivos cálculos relacionados com a geração de potência. Estes modelos apresentam a vantagem de operar em folhas de cálculo, permitindo flexibilidade e transparência. No entanto, apresentam como desvantagens, o facto de não poderem conciliar balanços de massa com balanços de calor e muitas vezes só serem entendidos pelo engenheiro que os desenvolveu. Para além destes modelos baseados em folhas de cálculo, existem os modelos desenvolvidos com recurso a simuladores de processo, originando modelos robustos de sistemas de vapor. As desvantagens destes modelos são o seu custo (licenças) e a sua estrutura demasiado rígida que poderá não permitir uma rápida avaliação de possíveis cenários. Entre estes modelos existem aqueles que se comportam como uma folha de cálculo, mas que permitem o acesso directo ao cálculo das principais propriedades de água e vapor. Para além de tirar partido das potencialidades de uma folha de

cálculo, permitem ainda efectuar o balanço de massa, de calor e de energia do sistema. Podem ser utilizados e entendidos por várias pessoas da empresa e podem ser facilmente ligados ao sistema de controlo distribuído de forma a obter dados em tempo real. A ferramenta informática, ProSteam, utilizada para a realização desta tese engloba-se neste último tipo.

O ProSteam apresenta-se como uma aplicação informática de simulação que utiliza o ambiente flexível do Microsoft Excel para modelizar sistemas de produção de energia eléctrica e calor. Esta aplicação permite reduzir os custos de capital e de operação de um sistema de utilidades, otimizando o projecto e as condições de operação. Os recursos da aplicação permitem a criação de modelos de sistemas de utilidades, induzindo o utilizador a tomar decisões sobre as condições operacionais, podendo também ser útil na avaliação dos custos e benefícios de diferentes configurações de cogeração, de estratégias de controlo e de opções de contracto de energia (KBC, 2008). Esta aplicação informática já foi usada em várias refinarias, exemplos disso são o seu uso em 2005 em cinco das refinarias da empresa TOTAL na Europa que permitiu uma melhor compreensão das questões fundamentais relacionadas com a melhoria dos seus sistemas de vapor e o caminho a seguir para realizar reduções nestes sistemas (KBC Newsletter Q1, 2006). Desta forma o ProSteam apresenta-se como uma ferramenta informática adequada para a modelização de sistemas de vapor e com vários casos de estudo no sector da refinação.

O conhecimento da empresa sobre esta aplicação informática e sobre o modelo desenvolvido pela KBC era apenas de utilização na óptica do utilizador.

3 Descrição Técnica e Discussão dos Resultados

A realização deste trabalho envolveu a execução de várias tarefas sequenciais que se encontram descritas abaixo.

3.1 Aquisição de conhecimentos em ProSteam e sobre o modelo energético desenvolvido para a RPP

A primeira etapa do trabalho relacionou-se com a aquisição de conhecimentos em ProSteam sobre a sua aplicação e potencialidades, tal como a aquisição de conhecimentos sobre a sua utilização.

De seguida procedeu-se à aquisição de conhecimentos sobre o modelo energético desenvolvido, bem como a recolha de diagramas de fluxo processual e diagramas de instrumentação e controlo com o objectivo de adquirir conhecimento sobre o sistema de vapor da RPP.

O modelo energético desenvolvido para a RPP pela KBC e actualizado durante o Mestrado Integrado em Engenharia Química realizado nesta empresa no primeiro semestre de 2007/2008 foi construído para as condições de projecto da RPP. É constituído por 16 folhas de cálculo que modelizam o sistema de vapor existente. Cada uma destas folhas de cálculo versa sobre diferentes aspectos do sistema de vapor, havendo uma interligação entre todas as folhas do modelo. A descrição do conteúdo de cada uma das folhas de cálculo é descrita de seguida:

- Folha de cálculo “Cost Summary”

A folha “Cost Summary” apresenta os cálculos relativos à análise económica do sistema de vapor e a sua eficiência energética global. Apresenta também os principais resultados relativos ao consumo/produção de energia eléctrica, vapor e combustíveis e as eficiências associadas à produção de energia eléctrica e vapor nos principais equipamentos do sistema de vapor.

- Folha de cálculo “Producers”

Trata-se da folha de cálculo onde se apresenta a listagem dos equipamentos produtores de vapor, incluindo parâmetros importantes tais como a entalpia, caudal mássico, nível de pressão do vapor produzido (alta, média e baixa pressão) e respectivo calor trocado.

- Folha de cálculo “Consumers”

Esta folha de cálculo apresenta a listagem dos equipamentos consumidores de vapor, incluindo parâmetros importantes tais como a entalpia, caudal mássico e níveis de pressão de vapor e condensados e o respectivo calor trocado em cada um destes equipamentos.

- Folha de cálculo “Drivers”

A folha “Drivers” apresenta a listagem de todas as turbinas de accionamento, movidas a vapor, indicando no caso dos pares turbina a vapor/motor eléctrico qual se encontra em funcionamento, a sua potência, caudal mássico de vapor e eficiência da turbina (quando esta se encontra em funcionamento).

- Folha de cálculo “Power Balance”

Nesta folha de cálculo apresenta-se o balanço à energia eléctrica.

- Folha de cálculo “Fuel Balance”

Apresenta o balanço material ao Fuel-gás produzido e consumido e ao Fuelóleo consumido.

- Folha de cálculo “Utils PFD”

Esta folha de cálculo apresenta a simulação do diagrama de fluxo processual e o balanço material e energético ao circuito de vapor e condensados da Fábrica de Utilidades (FUT). Apresenta também alguns cálculos relevantes de equipamentos importantes existentes nesta fábrica.

- Folha de cálculo “FOB PFD”

Esta folha de cálculo apresenta a simulação do diagrama de fluxo processual e o balanço material e energético ao circuito de vapor e condensados da Fábrica de Óleos Base (FOB).

- Folha de cálculo “FOC PFD”

Esta folha de cálculo apresenta a simulação do diagrama de fluxo processual e o balanço material e energético ao circuito de vapor e condensados da Fábrica de Combustíveis (FOC).

- Folha de cálculo “FAR PFD”

Esta folha de cálculo apresenta a simulação do diagrama de fluxo processual e o balanço material e energético ao circuito de vapor e condensados da Fábrica de Aromáticos (FAR).

- Folha de cálculo “Boilers”

Nesta folha de cálculo apresenta-se o balanço material e energético às caldeiras onde é gerado o vapor de alta pressão.

- Folha de cálculo “Furnaces”

Esta folha de cálculo apresenta o balanço energético às fornalhas e o balanço material aos combustíveis que as alimentam e todos os parâmetros importantes para estes equipamentos, tais como a sua eficiência energética global.

- Folha de cálculo “GTG”

Nesta folha de cálculo apresenta-se uma simulação preliminar de uma futura unidade de Cogeração a instalar na RPP, apresentando-se os respectivos balanços materiais e energéticos a esta unidade.

- Folha de cálculo “Misc Calcs”

Nesta folha de cálculo são apresentados diversos cálculos auxiliares necessários a praticamente todas as restantes folhas. Exemplos de alguns parâmetros calculados nesta folha são: entalpia, entalpia de líquido saturado e vapor saturado, temperatura e temperatura de saturação de algumas correntes, cálculos relacionados com câmaras de vaporização *flash* e cálculos relacionados com combustíveis e gases de combustão provenientes da queima destes, entre outros.

- Folha de cálculo “Cogen Calc”

Esta folha de cálculo apresenta os cálculos relativos à eficiência energética global actual e à eficiência energética global máxima que é possível atingir.

- Folha de cálculo “Compositions”

Nesta folha de cálculo encontram-se expressas as composições dos combustíveis típicos usados na RPP.

De forma a proporcionar ao utilizador uma fácil e rápida identificação das variáveis introduzidas pelo utilizador e das variáveis calculadas pelo modelo, estas apresentam cores diferentes. Assim as variáveis que apresentam a cor do tipo de letra azul, são introduzidas pelo utilizador e as que apresentam a cor preta são calculadas pelo modelo.

Este trabalho abordou as folhas de cálculo não contempladas no trabalho anterior (Feliciano, 2008). Assim as folhas de cálculo estudadas foram: “Drivers”, “Utils PFD”, “Cogen Calc”, “Fuel Balance”, “Power Balance”, “Compositions”, “GTG” e “Cost Summary”.

3.2 Estudo da folha de cálculo “Drivers”

Tal como referido anteriormente, nesta folha de cálculo encontra-se a listagem de todas as turbinas de accionamento movidas a vapor existentes na RPP. O objectivo desta folha de cálculo é estimar o caudal mássico de vapor necessário para alimentar as turbinas a vapor e no caso dos pares turbina a vapor/motor eléctrico em que o motor eléctrico se encontre em funcionamento em detrimento da turbina, a potência eléctrica necessária para o accionamento desse motor. Esta informação é importante para avaliar as necessidades de vapor e de potência eléctrica, que será usada em outras folhas de cálculo deste modelo (“Power Balance”, “Utils PFD”, “FOB PFD”, “FOC PFD” e “FAR PFD”).

Após uma análise detalhada de cada um dos campos desta folha foi possível verificar relativamente à eficiência das turbinas a vapor que este valor era introduzido pelo utilizador. Assim, procedeu-se ao desenvolvimento de uma folha de cálculo recorrendo a funções do ProSteam para o cálculo da eficiência de turbinas a vapor.

3.3 Desenvolvimento da folha de cálculo “Drivers Efficiency”

A Figura 1 a) e b) apresenta um excerto da folha de cálculo, “Drivers Efficiency”, que permite calcular a eficiência de turbinas a vapor, introduzindo como dados: a pressão e temperatura de entrada do vapor, a pressão de saída do vapor, a potência requerida e um dos seguintes dados, temperatura de saída do vapor, caudal mássico ou consumo específico de vapor, de acordo com a informação disponível. Com base nesta informação a folha calcula, não só a eficiência de turbinas a vapor para diferentes condições de saída do vapor, mas também adapta-se aos dados disponíveis nas folhas de dados das turbinas a vapor. No entanto é de referir que para o caso em que se encontre disponível a temperatura de saída do vapor, caudal mássico e consumo específico de vapor, toda esta informação deverá ser introduzida pelo utilizador.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	Area	Unit	Equipment	Inlet P gauge (kg/cm ² g)	Inlet T (°C)	Outlet P gauge (kg/cm ² g)	Outlet T (°C)	Required Power (MW)	Steam consumption (t/h)	Specific steam consumption (t/(MW.h))
3	FAR	U-300	PT-0307 S	12,00	191,11	1,86		0,090		38,42
4	FAR	U-300	PT-0311 S	12,00	191,11	1,86		0,047		42,50
5	FAR	U-400	PT-0401	65,00	420,00	19,60	310	1,048	19,545	

a)

K	L	M	N	O	P	Q
State of inlet steam	Inlet H (kcal/kg)	Inlet S (kcal/(kg.°C))	State of outlet steam	Outlet quality	Isentropic outlet H (kcal/kg)	Efficiency (%)
Saturated	666	1,55	Mixture of liquid and steam saturated	0,90	601	34,7%
Saturated	666	1,55	Mixture of liquid and steam saturated	0,90	601	31,4%
Superheated	769	1,57	Superheated	1,00	697	57,9%

b)

Figura 1 - Excerto da folha de cálculo “Drivers Efficiency”. a) Dados introduzidos, b) Parâmetros calculados.

Para além da eficiência de turbinas a vapor, esta folha calcula ainda o estado do vapor de entrada, a sua entalpia e entropia, o estado do vapor de saída, a sua qualidade (define-se qualidade como a fracção mássica de vapor numa mistura de líquido saturado e vapor saturado) e entalpia, tal como é visível através da Figura 1 b).

A metodologia de cálculo utilizada para o desenvolvimento desta folha encontra-se descrita detalhadamente no Anexo 1.

Após o desenvolvimento desta folha, procedeu-se à sua utilização para o cálculo da eficiência de todas as turbinas de accionamento existentes na RPP. Para isso foi necessário efectuar uma inventariação de todas as turbinas de accionamento existentes, tal como o seu estado de funcionamento actual (activa, reserva, fora de serviço e desmantelada), com recurso aos diagramas de fluxo processual e diagramas de instrumentação e controlo de todas as unidades e a recursos humanos desta empresa de forma a obter o seu estado de funcionamento actual. Desta forma, foram contabilizadas 53 turbinas de accionamento nos estados de funcionamento activo e reserva. Após esta inventariação efectuou-se a recolha de todas as folhas de dados referentes às turbinas inventariadas, de forma a obter os dados necessários para o cálculo da eficiência destas turbinas. De salientar que esta recolha se revelou uma tarefa bastante morosa.

As eficiências obtidas foram comparadas com as eficiências previstas pela KBC para as turbinas comuns às folhas “Drivers” e “Drivers Efficiency” e cujas eficiências foram calculadas para o mesmo valor de potência requerida.

Tabela 1 - Comparação entre a eficiência prevista pela KBC e a eficiência obtida através da folha “Drivers Efficiency” para algumas turbinas.

Área	Unidade	Equipamento	η_{KBC} (%)	η_{Actual} (%)	Erro absoluto
FAR	U-300	PT-0307 S	30,0%	34,7%	4,7%
	U-300	PT-0311 S	38,0%	31,4%	6,6%
FOB	U-2000	PT-2008 A	41,0%	41,4%	0,4%
	U-2000	PT-2054 B	46,0%	45,8%	0,2%
	U-2000	PT-2055	46,0%	45,8%	0,2%
	U-2100	PT-2101 B	43,0%	42,4%	0,6%
	U-2100	PT-2102 A/B	51,0%	51,1%	0,1%
	U-2200	PT-2204	30,0%	29,7%	0,3%
	U-2201	PT-2253 A	43,0%	40,7%	2,3%
	U-2202	PT-2253 B	41,0%	43,4%	2,4%
FOC	U-2203	PT-2302 A/B	41,0%	40,5%	0,5%
	U-1200	PT-1201 B	44,0%	43,6%	0,4%
	U-1300	PT-1305 B	22,0%	21,6%	0,4%
	U-1300	PT-1306 B	25,0%	25,4%	0,4%
	U-1500	PT-1501 A/B	51,0%	51,6%	0,6%
	U-3000	PT-3011 A/B	36,0%	35,7%	0,3%
	U-3300	PT-3304 B	22,0%	21,7%	0,3%
FUT	U-3300	PT-3308 B	25,0%	25,1%	0,1%
	U-4300	TC-4301 C	48,3%	59,7%	11,4%

Através da análise da tabela anterior é possível verificar que as eficiências calculadas com recurso à folha de cálculo desenvolvida apresentam-se bastante próximas dos valores previstos pela KBC. Existem apenas três turbinas que apresentam um erro absoluto mais acentuado, que é o caso da PT-0307 S, PT-0311 S e TC-4301 C. No entanto para o caso das turbinas PT-0307 S e PT-0311 S estas diferenças rondam os 4,7/6,6%. Relativamente ao TC-4301 C, esta diferença é bastante maior, da ordem dos 11,4%. Porém esta elevada diferença poderá prender-se com o facto de a KBC apresentar dúvidas relativas ao seu valor de eficiência, pois este valor surge com uma cor do tipo de letra vermelha, o que indica que sempre que isto acontece, a KBC apresenta dúvidas em relação ao valor obtido.

No sentido de minimizar o número de variáveis introduzidas pelo utilizador, sempre que a informação relativa à curva de consumo de vapor se encontrava disponível na folha de dados da turbina, esta foi ajustada matematicamente de forma a obter uma relação entre o caudal mássico de vapor necessário e a potência produzida ($\dot{m}_{TV} = f(W_S)$), permitindo desta forma que o caudal mássico de vapor seja calculado para a potência requerida.

No Anexo 2 encontra-se ilustrada a curva de consumo de vapor de uma turbina, retirada da sua folha de dados e a respectiva equação de interpolação.

No sentido de alertar o utilizador para um possível erro nos dados de entrada é apresentada a mensagem “Please check the input temperature and pressure”, no campo “State of inlet steam”, sempre que as condições de pressão e temperatura introduzidas, não correspondam a nenhuma condição de vapor.

3.4 Alteração e actualização da folha “Drivers”

Após o desenvolvimento da folha “Drivers Efficiency”, procedeu-se à alteração e actualização da folha “Drivers”.

Efectuaram-se algumas alterações ao nível de fórmulas de cálculo de alguns campos desta folha. As alterações foram relativas ao campo “Required Power”, onde esta variável passou a ser introduzida pelo utilizador não nesta folha, mas sim na folha “Drivers Efficiency”. O campo “Efficiency” foi também alterado, o que levou à necessidade do desenvolvimento da folha “Drivers Efficiency”, para que esta variável seja calculada pelo modelo e não introduzida pelo utilizador. Outra pequena alteração efectuada neste campo, visto que este campo se refere à eficiência da turbina a vapor e com o intuito de não induzir o utilizador em erro, o valor desta variável apenas aparece quando a turbina se encontra em funcionamento, não apresentando qualquer valor quando o motor eléctrico se encontra em funcionamento. Por último, a alteração efectuada, e a única que apresenta um impacto no modelo energético, refere-se ao campo “Flow”. Neste campo, no modelo da KBC era calculado o caudal mássico de vapor consumido pela turbina para produzir uma determinada potência necessária (com base no caudal mássico teórico de vapor por unidade de potência requerida para a expansão isentrópica do vapor dentro da turbina, potência requerida e eficiência da turbina). No modelo actual, a fórmula de cálculo deste campo foi actualizada visto que se possui o caudal mássico de vapor ou informação adicional (potência requerida e consumo específico de vapor) que o permite calcular. O valor do campo “Flow” passou a ser proveniente da folha “Drivers Efficiency”. Uma vez que este modelo foi desenvolvido para as condições de projecto da RPP, esta alteração torna o modelo mais próximo das condições de projecto, pois quer o caudal mássico de vapor, quer as informações necessárias para o seu cálculo são retiradas das folhas de dados das turbinas a vapor. De forma a avaliar o impacto desta alteração no consumo de vapor da RPP, comparou-se o caudal mássico de vapor consumido previsto pela KBC e o proveniente das folhas de dados das turbinas. Esta comparação foi efectuada para as turbinas comuns à folha de cálculo antes e depois da

alteração e actualização e cujas eficiências foram calculadas para o mesmo valor de potência requerida (Tabela 2).

Tabela 2 - Comparação entre o caudal mássico de vapor previsto pela KBC e o valor proveniente das folhas de dados para algumas turbinas.

Área	Unidade	Equipamento	m_{KBC} (t/h)	m_{Actual} (t/h)	Erro relativo (%)
FAR	U-300	PT-0307 S	3,075	3,458	11,1
	U-300	PT-0311 S	1,268	1,998	36,5
FOB	U-2000	PT-2008 A	1,690	3,180	46,9
	U-2000	PT-2054 B	4,707	9,048	48,0
	U-2000	PT-2055	4,707	9,048	48,0
	U-2100	PT-2101 B	2,568	2,980	13,8
	U-2100	PT-2102 A/B	5,519	6,280	12,1
	U-2200	PT-2204	0,613	0,715	14,2
	U-2201	PT-2253 A	2,719	5,500	50,6
	U-2202	PT-2253 B	2,851	5,158	44,7
	U-2203	PT-2302 A/B	2,297	2,640	13,0
FOC	U-1200	PT-1201 B	11,023	13,900	20,7
	U-1300	PT-1305 B	0,714	0,864	17,3
	U-1300	PT-1306 B	1,341	1,570	14,6
	U-1500	PT-1501 A/B	3,081	6,120	49,7
	U-3000	PT-3011 A/B	4,394	7,630	42,4
	U-3300	PT-3304 B	3,476	3,700	6,1
	U-3300	PT-3308 B	0,838	0,889	5,7
FUT	U-4300	TC-4301 C	5,378	6,100	11,8

Através da análise da Tabela 2 é possível verificar que para todas as turbinas a vapor analisadas, o caudal mássico de vapor proveniente das folhas de dados é sempre superior ao previsto pela KBC, apresentando para o caso das turbinas PT-2008 A, PT-2054 B, PT-2055, PT-2253 A e B, PT-1501 e PT-3011 A/B um caudal mássico de vapor de cerca do dobro do previsto pela KBC. Logo a utilização dos caudais mássicos de vapor previstos pela KBC conduzem a uma subestimativa do vapor necessário para estes accionadores.

Após as alterações acima mencionadas procedeu-se à actualização das turbinas listadas anteriormente, adicionando as turbinas em falta e eliminando as turbinas fora de serviço ou desmanteladas. Corrigiu-se também pequenas inconsistências existentes nos valores introduzidos no campo “Required Power”.

A Figura 2 a) e b) apresenta um excerto da folha “Drivers” antes e depois das alterações e actualizações efectuadas. De referir que os campos que apresentam uma cor de preenchimento verde foram alvo de uma alteração ao nível da sua fórmula de cálculo e as linhas que apresentam uma cor de preenchimento cor-de-laranja foram turbinas adicionadas e não contabilizadas no modelo energético inicial.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Area	Unit	Equipamento	Type	On/ Off	Turbine (1) or Motor (0)	Required Power (MW)	Turbine Power (MW)	Electric Power (MW)	Efficiency (%)	Flow (t/h)	Unit Type for Lookup
2												
3	FOB	U-2000	PT-2008	MP-BP	1	1	0,064	0,06		41,0%	1,69	U-2000MP-BP
4	FOB	U-2000	PT-2026	MP-BP	1		0,013		0,0	8,0%		U-2000MP-BP
5	FOB	U-2000	PT-2054B	MP-BP	1	1	0,20	0,20		46,0%	4,71	U-2000MP-BP
6	FOB	U-2000	PT-2055	MP-BP	1	1	0,20	0,20		46,0%	4,71	U-2000MP-BP
7	FOB	U-2100	PT-2101	MP-BP	1		0,102		0,1	43,0%		U-2100MP-BP
8	FOB	U-2100	PT-2102	MP-BP	1	1	0,260	0,26		51,0%	5,52	U-2100MP-BP
9	FOB	U-2200	PT-2203	MP-BP	1		0,076		0,1	33,0%		U-2200MP-BP
10	FOB	U-2200	PT-2204	MP-BP	1		0,017		0,0	30,0%		U-2200MP-BP
11	FOB	U-2200	PT-2205	MP-BP	1		0,061		0,1	38,0%		U-2200MP-BP
12	FOB	U-2200	PT-2253A	MP-BP	1		0,108		0,1	43,0%		U-2200MP-BP
13	FOB	U-2200	PT-2253B	MP-BP	1		0,108		0,1	41,0%		U-2200MP-BP
14	FOB	U-2300	PT2302	MP-BP	1		0,087		0,1	41,0%		U-2300MP-BP
15	FOB	U-2300	PT2312	MP-BP	1		0,051		0,1	37,0%		U-2300MP-BP
16	Total							0,72	0,6		16,62	

a)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Area	Unit	Equipment	Type	On/ Off	Turbine (1) or Motor (0)	Required Power (MW)	Turbine Power (MW)	Electric Power (MW)	Efficiency (%)	Flow (t/h)	Unit Type for Lookup
2												
3	FOB	U-2000	PT-2008 A	MP-BP	1	1	0,064	0,064		41,4%	3,18	U-2000MP-BP
4	FOB	U-2000	PT-2054 B	MP-BP	1		0,200		0,200			U-2000MP-BP
5	FOB	U-2000	PT-2055	MP-BP	1	1	0,200	0,200		45,8%	9,05	U-2000MP-BP
6	FOB	U-2100	PT-2101 B	MP-BP	1		0,102		0,102			U-2100MP-BP
7	FOB	U-2100	PT-2102 A	MP-BP	1	1	0,260	0,260		51,1%	6,28	U-2100MP-BP
8	FOB	U-2100	PT-2107 B	MP-BP	1		0,005		0,005			U-2100MP-BP
9	FOB	U-2200	PT-2203 A	MP-BP	1		0,061		0,061			U-2200MP-BP
10	FOB	U-2200	PT-2203 B	MP-BP	1		0,061		0,061			U-2200MP-BP
11	FOB	U-2200	PT-2204	MP-BP	1	1	0,017	0,017		29,7%	0,72	U-2200MP-BP
12	FOB	U-2200	PT-2253A	MP-BP	1	1	0,108	0,108		40,7%	5,50	U-2200MP-BP
13	FOB	U-2200	PT-2253B	MP-BP	1	1	0,108					U-2200MP-BP
14	FOB	U-2300	PT-2302 A	MP-BP	1	1	0,087	0,087		40,5%	2,64	U-2300MP-BP
15	FOB	U-2300	PT-2312 B	MP-BP	1		0,069		0,069			U-2300MP-BP
16	Total							0,735	0,498		27,36	

b)

Figura 2 - Excerto da folha “Drivers”, a) Antes da alteração e actualização, b) Depois da alteração e actualização.

3.5 Estudo detalhado e alteração da folha “Utils PFD”

A folha de cálculo “Utils PFD” apresenta a simulação do diagrama de fluxo processual e o balanço material e energético ao circuito de vapor e condensados da FUT. Apresenta também alguns cálculos de equipamentos importantes, existentes nesta fábrica.

Esta folha de cálculo foi estudada detalhadamente e alterada. As alterações efectuadas relacionaram-se com o cálculo da potência no eixo das bombas centrífugas P-4001 A-E/J, P-4002 A-C, P-4003 A/B e P-4101 D-G. A metodologia de cálculo seguida pela KBC estima a potência no eixo através das curvas de potência das bombas centrífugas (sempre que esta informação se encontre disponível). No entanto esta metodologia apenas foi utilizada para o cálculo da potência no eixo das bombas P-4001 A-E/J, talvez devido à inexistência de informação relativa às curvas de potência das restantes bombas centrífugas. De referir ainda que a KBC assumiu as bombas centrífugas P-4001 A, B, C, D, E e J como sendo iguais, o que não é verdade, pois a bomba P-4001 J é diferente das restantes. O ajuste efectuado pela KBC à curva de potência da bomba P-4001 J não abrange toda a gama de caudais da bomba, o que limita a utilização desta equação de ajuste. Desta forma procedeu-se à recolha das folhas de dados e respectivas curvas de potência relativas a estas bombas, de modo a ajustar matematicamente estas curvas. No Anexo 3 encontra-se ilustrada a curva de potência de uma bomba centrífuga, retirada da sua folha de dados e a respectiva equação de ajuste. Assim o cálculo da potência no eixo para estas bombas é efectuado com recurso aos ajustes das curvas de potência das bombas P-4001 A-E e P-4001 J. A Figura 3 a) e b) ilustra a folha “Utils PFD” relativa às bombas P-4001 A-E/J antes e depois das alterações efectuadas.

HP BFW Pumps		HP BFW Pumps	
Max capacity	104,5 t/h	Max capacity	99,1 t/h
BFW flow	284,9 t/h	BFW flow	256,6 t/h
Min. no. of pumps	3	Min. no. of pumps	3
No. operating	3	No. operating	3
Flow per pump	95,0 t/h	Flow per pump	85,5 t/h
Pump power	0,36 MW	Power of the pumps P-4001 A-E	0,35 MW
		Power of the pump P-4001 J	0,37 MW
		Total pump power	1,06 MW

a) b)

Figura 3 - Folha “Utils PFD” relativa às bombas P-4001 A-E/J, a) Antes da alteração, b) Depois da alteração.

Desta forma, as alterações efectuadas permitem calcular a potência no eixo para toda a gama de caudais destas bombas.

Relativamente às restantes bombas, a KBC calculou a potência específica no eixo necessária (potência por unidade de caudal mássico a bombear), com recurso à função Water Pump Model(Inlet Enthalpy; Inlet Pressure; Outlet Pressure; Mass Flow; Efficiency; LM_SteamConfig), contida no ProSteam. Apesar de o modelo apresentar resultados próximos dos obtidos a partir das folhas de dados das respectivas bombas procedeu-se à introdução das equações de ajuste das respectivas curvas de potência destas bombas, de forma a aproximar estes resultados e consequentemente o modelo energético das condições de projecto. De referir que relativamente às bombas P-4002 A-C, os resultados obtidos pela KBC para a potência no eixo são bastantes diferentes dos obtidos através da curva de potência destas bombas. Este facto deve-se a um erro nos dados introduzidos na função Water Pump Model.

3.6 Detecção e correcção de falhas na folha de cálculo “Misc Calcs”

Esta folha apresenta diversos cálculos auxiliares necessários às restantes folhas do modelo. Exemplos de alguns parâmetros calculados nesta folha são: entalpia, entalpia de líquido saturado e vapor saturado, temperatura e temperatura de saturação de algumas correntes, entalpia e caudais mássicos das correntes de saída de câmaras de vaporização *flash* e cálculos relacionados com os combustíveis, tais como o seu poder calorífico inferior, razão caudal mássico de ar/caudal mássico de combustível entre outros.

Após uma análise detalhada desta folha de cálculo, foi possível verificar que existiam valores com uma cor de preenchimento amarela e que foram colados nas respectivas células. Desta forma qualquer alteração nos dados necessários para o cálculo dessas variáveis, não surtia efeito no resultado das mesmas. Assim procedeu-se à substituição desses valores colados pelas respectivas funções do ProSteam ou pelas fórmulas de cálculo que lhe deram origem. Para se efectuar essa substituição, recorreu-se ao manual de apoio da aplicação informática de forma a conhecer as funções desta aplicação, o que correspondeu a um processo moroso de tentativa/erro. Pois no caso de determinadas variáveis foi difícil identificar os dados correctos para o seu cálculo.

A Figura 4 ilustra parte da folha “Misc Calcs” relativa ao cálculo de alguns parâmetros relacionados com os combustíveis (poder calorífico inferior, razão caudal mássico de ar/caudal mássico de combustível, fracções mássicas de dióxido de carbono e dióxido de enxofre nos gases de combustão e respectivas razões caudal mássico de dióxido de carbono/caudal

mássico de combustível e caudal mássico de dióxido de enxofre/caudal mássico de combustível).

36	Fuel Type	FO	Tail gas	Misc gas	FG
37	LHV	8701 kcal/kg	11719 kcal/kg	15805 kcal/kg	13396 kcal/kg
38	Air required (tAir/tFuel)	13,70	16,41	20,55	18,11
39	% CO2 in combustion products	21,79%	16,43%	10,15%	13,52%
40	% SO2 in combustion products	0,27%	0,00%	0,01%	0,00%
41	Tco2/TFUEL	3,2	2,9	2,2	2,6
42	TSO2/TFUEL	0,04	0,00	0,00	0,00

Figura 4 - Parte da folha “Misc Calcs” relativa ao cálculo de diversos parâmetros relacionados com os combustíveis.

A Figura 5 a) e b) apresenta a célula relativa ao poder calorífico inferior (LHV) para o Fuelóleo (FO), antes e depois da introdução da respectiva função contida no ProSteam que lhe deu origem.

f_x 9701,2596331327

a)

f_x =Fuel_LHV(Compositions!D17;LM_SteamConfig)

b)

Figura 5 - Célula relativa ao cálculo do poder calorífico inferior (LHV) para o Fuelóleo (FO), a) Antes da alteração e b) Depois da alteração.

Estas alterações permitem uma actualização constante das variáveis calculadas nesta folha, sempre que os dados necessários para o seu cálculo sofram mudanças tornando este modelo energético facilmente adaptável a novas situações.

3.7 Finalização da actualização do modelo energético

Para além das folhas de cálculo abordadas durante o Mestrado Integrado em Engenharia Química realizado nesta empresa no primeiro semestre de 2007/2008 e das já abordadas neste trabalho foram ainda estudadas detalhadamente as folhas de cálculo “Power Balance”, “GTG” e “Compositions”, no entanto visto estas não terem sofrido modificações, não foram referidas durante este trabalho. O mesmo sucede com as folhas “Cogen Calc” e “Fuel Balance” que foram estudadas detalhadamente e alteradas, no entanto as modificações

sofridas por estas folhas foram pequenas, não suscitando alvo para discussão durante este trabalho.

Por último e com o intuito de finalizar a actualização do modelo energético, foi estudada detalhadamente a folha “Cost Summary”. Esta folha apresenta-se como a folha de resultados de todo o modelo energético, sendo nela apresentada a análise económica ao sistema de vapor e a sua eficiência energética global. Apresenta também alguns parâmetros importantes calculados em outras folhas de cálculo, tais como o consumo de diversos combustíveis e respectivas emissões de dióxido de carbono e dióxido de enxofre provenientes da queima destes, necessidade local de potência eléctrica, potência produzida, importada e exportada e consumo de vapor entre outras.

A Figura 6 a) e b) ilustra parte da folha “Cost Summary” relativa à potência eléctrica e eficiência energética global do sistema de vapor. Por razões de confidencialidade não são divulgados os resultados obtidos para a análise económica do sistema de vapor.

15	Power Costs	
16		Use
17	Site Demand	20,98 MW
18	Power Generation	20,98 MW
19	Site Import	0,00 MW
20	Site Export	0,00 MW
21		

48	Site Cycle Efficiency	68,6%
----	-----------------------	-------

Figura 6 - Excerto da folha “Cost Summary” relativo à a) Potência eléctrica e b) Eficiência energética global do sistema de vapor.

Após todas as alterações e actualizações efectuadas no modelo energético, os respectivos balanços materiais ao vapor e à água e o balanço energético efectuado ao sistema de vapor encontram-se fechados. No caso do balanço energético ao sistema de vapor, este deverá fechar com um erro máximo de 2%. Actualmente, o modelo energético apresenta um erro de 1%.

Os resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético.

Parâmetro	Resultados obtidos
Consumo total de combustíveis (Gcal/h)	469,3
Necessidade local de potência eléctrica (MW)	20,98
Potência eléctrica gerada (MW)	20,98
Consumo de vapor de alta pressão (t/h)	244,7
Eficiência energética global do sistema de vapor (%)	68,6

Terminada a alteração e actualização do modelo, os valores expressos na folha “Cost Summary” para os diversos parâmetros constituíram a nova base do modelo (caso base), ou seja o termo de comparação para qualquer modificação efectuada nos dados de entrada do modelo energético. Para isso foi necessário colar os resultados finais obtidos para os diversos parâmetros expressos nesta folha de cálculo, de forma a avaliar o impacto das alterações efectuadas ao nível dos dados de entrada e possíveis configurações de operação do sistema de vapor. Este impacto é observado através de um aumento ou diminuição de um determinado parâmetro (consumo de combustíveis, potência eléctrica produzida, vapor consumido entre outros) e o respectivo aumento ou diminuição em termos económicos. Permitindo desta forma avaliar o impacto nos custos de operação (que incluem os custos associados aos combustíveis, potência eléctrica e vapor, água desmineralizada de *Make-up* e emissão de poluentes).

3.8 Previsão do impacto energético de algumas modificações na folha “Drivers”

Uma vez validado e actualizado o modelo energético torna-se possível avaliar o impacto das alterações nos dados de entrada e prever o impacto energético de alterações ao nível de alguns pares turbina a vapor/motor eléctrico. Deste modo procedeu-se à avaliação do impacto energético das alterações ao nível da folha “Drivers”, ligando ou desligando diferentes accionadores (turbina a vapor ou motor eléctrico), ou simulando a existência de motores eléctricos na ausência destes. Este estudo foi efectuado para 3 turbinas a vapor que apresentam maior consumo de vapor. Assim, foram estudadas as turbinas PT-0401, PT-1201 B e a PT-4401 F. Os resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético para as 3 turbinas estudadas.

Parâmetro	Modelo actualizado	PT-0401 desligada	PT-1201 B ligada	PT-4401 C ligada
Consumo total de combustíveis (Gcal/h)	469,3	467,3	473,9	473,3
Necessidade local de potência eléctrica (MW)	20,98	22,02	20,53	20,38
Potência eléctrica gerada (MW)	20,98	22,02	20,53	20,38
Consumo de vapor de alta pressão (t/h)	244,7	241,1	251,4	250,5
Eficiência energética global do sistema de vapor (%)	68,6	69,9	66,9	67,2
Impacto nos custos de operação (M€/ano)*	---	-0,3	+0,8	+0,7

* Este impacto nos custos é relativo ao modelo actualizado, que é considerado o caso base

Através da análise da Tabela 4, é possível verificar que relativamente à turbina PT-0401, a sua substituição por um motor eléctrico apresenta-se vantajosa, pois conduz a um aumento da eficiência energética global do sistema de vapor de cerca de 1,3 %, devido ao menor consumo de vapor e de combustíveis, apresentando o seu reflexo económico em termos da redução dos custos de operação em cerca de 0,3 milhões de euros por ano.

Para o caso da turbina PT-1201B, a sua entrada em funcionamento, apresenta um impacto energético negativo no sistema de vapor, tal como é possível verificar pela diminuição em cerca de 1,7 % na eficiência energética global deste. Esta diminuição é devida ao aumento na produção de vapor de alta pressão em cerca de 6,7 t/h e consequentemente num aumento no consumo total de combustíveis de cerca de 4,6 Gcal/h. Estes aumentos reflectem-se num aumento do custo de operação em cerca de 0,8 milhões de euros por ano.

Para o caso da turbina PT-4401 C, a sua entrada em funcionamento, à semelhança da PT-1201 B conduz a um impacto negativo no sistema de vapor, tal como é possível verificar pela diminuição em cerca de 1,4 % na eficiência energética global do sistema de vapor. Mais uma vez tal como a turbina PT-1201 B, esta diminuição é devida ao aumento na produção de vapor de alta pressão em cerca de 5,8 t/h e consequentemente num aumento do consumo total de combustíveis de cerca de 4,0 Gcal/h. Em termos económicos, existe também um aumento de cerca de 0,7 milhões de euros por ano nos custos de operação.

Através deste estudo comparativo é possível verificar que o modelo energético desenvolvido se apresenta como uma ferramenta bastante útil, para determinar o impacto a nível energético dos pares turbina a vapor/motor eléctrico e na previsão de futuros investimentos com o objectivo de aumentar a eficiência energética do sistema de vapor.

3.9 Previsão do impacto energético da futura unidade de Cogeração

Com o modelo energético da RPP validado e actualizado, passou-se à segunda parte do trabalho que se relacionou com o impacto energético das novas unidades a instalar futuramente. As novas unidades aqui abordadas foram: Cogeração, Destilação sob Vácuo e Viscorredução

Assim começou-se por introduzir uma folha de cálculo relativa à unidade de Cogeração no modelo energético de forma a avaliar o impacto desta unidade, posteriormente actualizou-se o modelo onde se introduziu além da unidade de Cogeração, as unidades de Destilação sob Vácuo e Viscorredução obtendo desta forma dois novos modelos energéticos.

A futura unidade de Cogeração a instalar na RPP tem como objectivo satisfazer todas as necessidades de vapor de alta pressão da Refinaria, permitindo a redução das emissões atmosféricas produzidas no actual sistema de energia, tornando-o também mais eficiente. De referir que esta unidade de Cogeração será construída nos terrenos da RPP, apresentando no entanto uma gestão por parte de outra empresa do grupo Galp Energia (Galp Power), funcionando esta empresa como um fornecedor externo de energia eléctrica e vapor à RPP.

A unidade de Cogeração a instalar, apresenta uma tecnologia CCGT (Combined Cycle Gas Turbine) e é constituída pelos seguintes elementos funcionais principais:

- Dois grupos geradores, constituídos pela associação de duas turbinas a gás, cada uma com uma potência de 41 MW alimentadas a gás natural.
- Duas caldeiras de recuperação da energia contida nos gases de exaustão das turbinas, equipadas com um sistema de queima suplementar utilizando gás natural para produzir, no máximo, cada uma 150 t/h de vapor de alta pressão.

A introdução da unidade de Cogeração conduzirá à paragem das actuais caldeiras geradoras de vapor de alta pressão (SG-4001 A-D/G/H) e à paragem do Turbogruppo, TG-4002 (Turbina de Condensação), no entanto todo o actual circuito de vapor e condensados permanecerá inalterado.

A previsão do impacto energético desta unidade na RPP foi estimada com base nas informações anteriores e em algumas hipóteses assumidas, devido à inexistência de dados. As hipóteses assumidas foram:

- Ambas as turbinas a gás se encontram em funcionamento contínuo e à potência máxima.
- Eficiência de 0,3 (30 %) para as turbinas a gás relativo à produção de potência eléctrica (Smith, 2005).
- Eficiência de 0,7 (70 %) para as caldeiras de recuperação de calor (Branan, 2002).
- Fracção mássica de *blowdown* de 0,03 (3 %) (Smith, 2005).
- Consumo interno de energia eléctrica da unidade de 0,50 MW (de acordo com o valor utilizado pela KBC aquando do desenvolvimento da folha de cálculo “GTG”).

Desta forma foi possível desenvolver a folha de cálculo, “Cogeneration” que permite prever a quantidade anual de vapor de alta pressão produzida, a energia eléctrica anual vendida para a RPP e para a Rede Eléctrica Nacional (REN), consumo anual de gás natural e a sua eficiência energética global. A metodologia de cálculo utilizada no desenvolvimento desta folha de cálculo encontra-se descrita detalhadamente no Anexo 4.

A Figura 7 ilustra parte da folha de cálculo desenvolvida relativa à produção de potência eléctrica e vapor.

4	Power generation	
5	Power	82,00 MW
6	Efficiency	30%
7	Fuel duty	235,02 Gcal/h
8	Internal consumption	0,50 MW

a)

26	Necessary steam flow	
27	Steam flow	211,5 t/h
28	Blowdown flow	6,3 t/h
29	BFW flow	217,8 t/h
30		
31	Annual consumption of steam (Mt)	1,8

b)

Figura 7 - Parte da folha “Cogeneration” relativa à, a) Produção de potência eléctrica, b) Produção de vapor de alta pressão.

Os resultados obtidos para a quantidade anual de vapor de alta pressão produzida, energia eléctrica anual vendida para a RPP e para a REN, consumo anual de gás natural e eficiência energética global da unidade encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Principais resultados obtidos para a unidade de Cogeração.

Parâmetro	Resultados obtidos
Vapor produzido anualmente (Mt)*	1,8
Energia eléctrica anual para a RPP (GWh)	50
Energia eléctrica anual para a REN (GWh)	651
Consumo anual de gás natural (MNm ³)**	220+30***
Eficiência energética global da unidade (%)	77,9

* Milhões de toneladas

** Milhões de normais metros cúbicos

*** Consumo anual de gás natural nas turbinas a gás + consumo anual de gás natural na queima suplementar

De seguida efectuou-se as devidas alterações nas folhas de cálculo “Utils PFD”, “Power Balance” e “Cost Summary” de modo a simular a futura unidade de Cogeração no actual sistema de vapor. Os resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético apresentam-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético que inclui a unidade de Cogeração.

Parâmetro	Resultados obtidos
Consumo total de combustíveis (Gcal/h)	296,7
Necessidade local de potência eléctrica (MW)	20,52
Potência eléctrica gerada (MW)	14,67
Consumo de vapor de alta pressão (t/h)	211,5
Eficiência energética global do sistema de vapor (%)	77,9

Através da análise das Tabelas 3 e 6 é possível verificar que a introdução da futura unidade de Cogeração permite reduzir o consumo total de combustíveis em cerca 172,6 Gcal/h. Esta redução deve-se à maior eficiência do sistema de produção de energia tal como é possível

verificar pelo aumento de eficiência de cerca de 9,3 %. De referir que visto que todo o vapor e parte da energia eléctrica é proveniente da unidade de Cogeração, este valor de eficiência energética global do sistema de vapor refere-se à unidade de Cogeração. Relativamente à necessidade local de potência eléctrica, esta diminui ligeiramente. As variações neste parâmetro devem-se a variações na potência eléctrica requerida pelos pares turbina a vapor/motor eléctrico. Mais precisamente esta diminuição está relacionada com a paragem dos ventiladores das caldeiras geradoras de vapor de alta pressão. A potência eléctrica gerada internamente diminui em cerca de 6,31 MW, visto que o Turbogrupos, TG-4002 se encontra parado e existe também uma diminuição, tal como foi referido anteriormente, na necessidade local de potência eléctrica. A paragem do Turbogrupos, TG-4002, conduz consequentemente a uma diminuição no consumo de vapor de alta pressão em cerca de 33,2 t/h. Em termos económicos a implementação desta unidade de Cogeração permitirá reduzir os custos de operação em cerca de 10,5 milhões de euros por ano. Desta forma é possível afirmar que a futura unidade de Cogeração terá um impacto fortemente positivo no actual modelo energético da RPP.

3.10 Previsão do impacto energético das futuras unidades de Destilação sob Vácuo e Viscosredução

De modo a obter uma estimativa do impacto energético das futuras unidades de Destilação sob Vácuo (U-10000) e Viscosredução (U-10100), procedeu-se ao desenvolvimento da folha “New Units” no modelo energético que engloba a Cogeração. Esta folha de cálculo foi desenvolvida para ambas as unidades, pois o seu circuito de vapor e condensados é comum. Desta forma procedeu-se inicialmente à recolha e estudo de todos os diagramas de fluxo processual e diagramas de instrumentação e controlo de ambas as unidades e a outros documentos relevantes, de forma a compreender este novo circuito de vapor e identificar todos os consumidores e produtores de vapor, nível de pressão de vapor e caudais mássicos envolvidos.

Terminada esta fase efectuou-se a introdução dos equipamentos produtores de vapor na folha de cálculo “Producers”, de forma a determinar o caudal mássico de vapor produzido e nível de pressão de vapor, a sua entalpia e o calor trocado em cada um destes equipamentos. Esta informação será posteriormente utilizada na folha “New Units” de forma a efectuar o respectivo balanço material e energético a estas novas unidades. A Figura 8 ilustra os equipamentos introduzidos nesta folha de cálculo, tal como os respectivos parâmetros.

2	Area	Unit	Equipment	On/Off	Steam Level	Base Duty Gcal/h	Base Flow (t/h)
3							
14	New Units	U-10000	E-10008	1	MP		13,5
15	New Units	U-10000	E-10010	1	MP		5,8
16	New Units	U-10000	E-10011	1	MP		1,7
17	New Units	U-10100	E-10102	1	MP		6,4

Figura 8 - Parte da folha “Producers” relativa aos equipamentos das unidades de Destilação sob Vácuo (U-10000) e Viscosredução (U-10100).

De seguida procedeu-se à introdução dos equipamentos consumidores de vapor na folha de cálculo “Consumers”, de forma a determinar o caudal mássico de vapor consumido e de condensados recuperados tal como as respectivas entalpias. Mais uma vez esta informação é utilizada na folha “New Units” para efectuar o balanço material e energético a estas unidades. A Figura 9 ilustra os equipamentos introduzidos nesta folha de cálculo e os respectivos parâmetros.

2	Area	Unit	Equipment	On/Off	Steam Level	Base Duty (Gcal/h)	Base Flow (t/h)	Condensate Return (%)
3								
129	New Units	U-10000	H-10001 Injection steam	1	MP		0,7	
130	New Units	U-10000	T-10001	1	MP		3,7	
131	New Units	U-10000	X-10002	1	MP		4,4	
132	New Units	U-10100	H/R-10101 Barrier steam	1	MP		2,0	
133	New Units	U-10100	T-10101	1	MP		1,3	
134	New Units	U-10100	H-10101 Emergency steam	1	MP		2,0	
135	New Units	U-10100	T-10102	1	MP		0,2	
136	New Units	U-10100	E-10109	1	BP		0,4	100%
137	New Units	U-10100	Total instrument purges	1	MP		0,9	
138		Total New Units						

Figura 9 - Parte da folha “Consumers” relativa aos equipamentos das unidades de Destilação sob Vácuo (U-10000) e Viscosredução (U-10100).

Após a introdução dos novos equipamentos nas folhas de cálculo “Producers” e “Consumers”, procedeu-se ao desenvolvimento da folha “New Units”. O seu desenvolvimento envolveu algumas hipóteses devido à inexistência de dados no momento da realização deste trabalho. As hipóteses assumidas foram:

- Apenas foram considerados os consumos de vapor dos equipamentos principais.
- Desprezou-se o consumo de vapor associado a purgas.
- Desprezou-se o acréscimo no consumo de energia eléctrica introduzido por estas unidades.

A folha “New Units” foi desenvolvida segundo a metodologia utilizada pela KBC em outras folhas de cálculo deste modelo (“Utils PFD”, “FOB PFD”, “FOC PFD” e “FAR PFD”) para efectuar os respectivos balanços materiais e energéticos ao circuito de vapor e condensados destas novas unidades.

A Figura 10 ilustra o modelo de simulação do diagrama de fluxo processual do circuito de vapor e condensados relativo às unidades de Destilação sob Vácuo e Viscosredução.

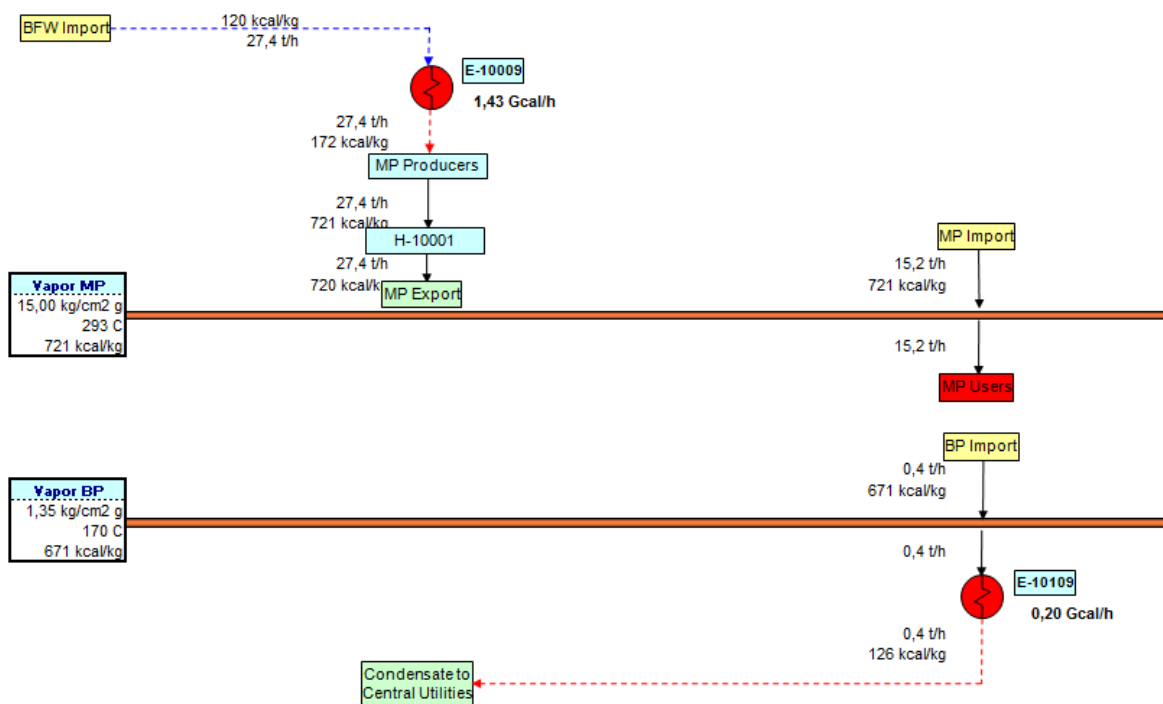


Figura 10 - Modelo de simulação do circuito de vapor e condensados das unidades de Destilação sob Vácuo (U-10000) e Viscosredução (U-10100).

Para além das folhas de cálculo já mencionadas, adicionou-se na folha “Fuel Balance”, o caudal mássico de Fuel-gás produzido e consumido por estas unidades e efectuou-se pequenas alterações em outras folhas de cálculo.

Os resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético que inclui a unidade de Cogeração, Destilação sob vácuo e Viscorredução.

Parâmetro	Resultados obtidos
Consumo total de combustíveis (Gcal/h)	342,8
Necessidade local de potência eléctrica (MW)	20,51
Potência eléctrica gerada (MW)	13,32
Consumo de vapor de alta pressão(t/h)	198,4
Eficiência energética global do sistema de vapor (%)	78,3

Através da análise das Tabelas 6 e 7 é possível verificar que a introdução das unidades de Destilação sob Vácuo e Viscorredução conduzem a um aumento no consumo total de combustíveis de cerca de 46,1 Gcal/h, relativamente ao modelo energético que engloba a unidade de Cogeração. Este facto acontece, pois apesar de estas unidades produzirem Fuel-gás, o seu consumo excede a sua produção, provocando um aumento no consumo total de combustíveis. Relativamente à necessidade local de potência eléctrica, esta manteve-se praticamente constante. A potência gerada internamente diminui em cerca de 1,35 MW, visto que estas novas unidades apresentam uma produção de vapor de média pressão superior ao seu consumo, enviando este excedente de vapor de média pressão para o circuito de vapor. Logo o Turbogruppo TG-4003 (turbina de contra-pressão), que funciona de acordo com as necessidades de vapor de média pressão, se estas necessidades diminuem, ele irá consumir um caudal mássico de vapor de alta pressão menor e consequentemente produzirá uma potência eléctrica mais baixa. Desta forma o caudal mássico de vapor de alta pressão consumido diminui cerca de 13,1 t/h. A eficiência energética global do sistema de vapor aumenta cerca de 0,4 %. Este aumento prende-se com o facto de esta eficiência estar associada à nova unidade de Cogeração. Visto que a energia contida nos gases de exaustão das turbinas a operar na potência máxima apenas permite produzir no máximo 177,4 t/h de vapor de alta pressão sem recurso a uma queima suplementar nas caldeiras de recuperação de calor. Logo a eficiência energética global máxima será atingida para o caso de não existir uma queima suplementar nas caldeiras de recuperação de calor. Assim, quer para o modelo energético que contem a Cogeração, quer para o modelo energético que contém as restantes novas unidades, existe a necessidade de queima adicional de combustível nas caldeiras de recuperação. No entanto visto que a necessidade de vapor de alta pressão é menor para o segundo caso, o que implica um menor consumo de gás natural nesta queima suplementar e

consequentemente um aumento da eficiência energética global do sistema de vapor. Em termos económicos a introdução destas novas unidades conduzem a um aumento nos custos de operação de cerca de 5,4 Milhões de euros por ano. Este aumento deve-se principalmente ao aumento do consumo total de combustíveis.

3.11 Previsão do impacto energético das futuras unidades de Cogeração, Destilação sob Vácuo e Viscorredução

De forma a efectuar uma análise comparativa dos resultados obtidos para o modelo energético actualizado, para o modelo energético que engloba a unidade de Cogeração e para o modelo energético que contém para além da unidade de Cogeração, as unidades de Destilação sob Vácuo e Viscorredução, compilou-se todos estes resultados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados obtidos para os principais parâmetros do modelo energético para os três modelos desenvolvidos.

Parâmetro	Modelo actualizado	Modelo com a Cogeração	Modelo com todas as novas unidades
Consumo total de combustíveis (Gcal/h)	469,3	296,7	342,8
Necessidade local de potência eléctrica (MW)	20,98	20,52	20,51
Potência eléctrica gerada (MW)	20,98	14,67	13,32
Consumo de vapor de alta pressão (t/h)	244,7	211,5	198,4
Eficiência energética global do sistema de vapor (%)	68,6	77,9	78,3
Impacto nos custos de operação (M€/ano)*	---	-10,5	-5,0

*Este impacto nos custos é relativo ao modelo actualizado, que é considerado o caso base

A Tabela 8 resume todos os principais resultados obtidos para os três modelos desenvolvidos. Através de uma análise comparativa global à Tabela 8, visto que uma análise detalhada já foi efectuada anteriormente, é possível verificar que quer a introdução das três novas unidades, quer apenas a introdução da unidade de Cogeração apenas, apresentam um impacto positivo no desempenho energético da RPP, conduzindo assim a uma redução nos custos de operação.

Em termos de eficiência, a introdução das três novas unidades conduzem a uma eficiência energética global ligeiramente superior ao modelo que apenas considera a Cogeração. Este aumento na eficiência deve-se ao facto de existir uma queima suplementar nas caldeiras de recuperação de calor com um consumo menor de combustível, visto que o consumo de vapor de alta pressão é também menor. Relativamente à redução nos custos de operação, esta é maior para o caso da introdução apenas da unidade de Cogeração, visto que para o caso em que se considera as três novas unidades, existe um aumento no consumo total de combustíveis, fazendo desta forma aumentar os custos de operação. Este aumento tal como referido anteriormente é devido ao consumo adicional de Fuel-gás por parte das unidades de Destilação sob vácuo e Viscosredução.

4 Conclusões

O presente trabalho apresentou como objectivos principais: a conclusão da validação e actualização do modelo energético desenvolvido para a RPP e a previsão do impacto energético das futuras unidades de Cogeração, Destilação sob Vácuo e Viscorredução, a instalar na RPP.

Relativamente ao primeiro objectivo, foi possível concluir que o modelo energético desenvolvido se encontrava desactualizado e que possuía inconsistências a nível de cálculo e de valores introduzidos. Desta forma o modelo foi validado e actualizado obtendo-se um modelo validado para as condições de projecto.

A introdução das três novas unidades permitiu concluir que as suas implementações apresentam um impacto energético positivo no actual sistema de vapor. Facto que é visível através do aumento da eficiência energética global do sistema de vapor, reflectindo-se numa redução dos custos de operação, relativamente ao sistema de vapor actual.

As futuras unidades de Destilação sob Vácuo e Viscorredução apresentam um impacto energético positivo relativamente ao modelo que engloba a Cogeração. Este impacto positivo é traduzido num aumento da eficiência energética global do sistema de vapor. No entanto, em termos de custos de operação, estas unidades apresentam um impacto negativo em comparação com o modelo que considera a Cogeração. Este facto é devido ao acréscimo no consumo total de Fuel-gás por parte destas unidades.

Os modelos energéticos desenvolvidos permitem à RPP dispor de ferramentas de simulação e de previsão a nível energético. Através destes modelos é possível prever o impacto energético de diferentes cenários de operação, futuras reformulações processuais e futuros investimentos.

5 Avaliação do trabalho realizado

5.1 Objectivos Realizados

Esta tese teve como principais objectivos: a conclusão da validação e actualização do modelo energético e a previsão do impacto energético das futuras unidades de Cogeração, Destilação sob Vácuo e Viscorredução, a instalar na RPP.

Relativamente ao primeiro objectivo este foi atingido, apresentando-se o modelo energético validado e actualizado para as condições de projecto da RPP. O segundo objectivo foi também atingido, tendo-se desenvolvido dois modelos energéticos que apresentam uma estimativa do impacto energético da unidade de Cogeração e das unidades de Destilação sob Vácuo e Viscorredução, respectivamente.

5.2 Trabalho Futuro

Em termos de trabalho futuro, visto que o modelo energético se encontra validado e actualizado, a próxima etapa seria actualizar o modelo para as condições operatórias da RPP, efectuando posteriormente a ligação ao sistema de controlo distribuído, de forma a obter os dados necessários para o modelo em tempo real. Este modelo poderá também servir de base para o desenvolvimento de um novo modelo com integração de algoritmos de optimização, que possibilita a determinação das condições de operação do sistema de vapor que minimiza os custos de operação.

5.3 Apreciação final

O trabalho relativo à conclusão da validação e actualização do modelo energético foi terminado, obtendo-se um modelo energético de acordo com as condições de projecto da RPP.

Por outro lado desenvolveu-se mais dois modelos energéticos de forma a prever o impacto da futura unidade de Cogeração e das futuras unidades de Destilação sob Vácuo e Viscorredução, respectivamente. Dotando desta forma a RPP de uma primeira estimativa do impacto energético destas unidades.

Do ponto de vista da valorização pessoal, destaca-se a possibilidade do contacto com problemas reais de engenharia. Salienta-se ainda a oportunidade de ter integrado a rotina de uma empresa e as amizades criadas nesta. Desta forma descrevo esta experiência como bastante enriquecedora e marcante quer a nível profissional, quer a nível pessoal.

Referências

- Benaroya, A., *Fundamentals and Applications of Centrifugal Pumps for the Practicing Engineer*. Petroleum Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1978.
- Branan, C.R., *Rules of Thumb for Chemical Engineers: A manual of quick, accurate solutions for everyday, process engineering problems*, Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, 2002.
- Capros, P., Mantzos, L., Papandreu, V., Tasios, N., *European Energy and Transport*, 2008. URL: http://www.energy.eu/publications/KOAC07001ENC_002.pdf, acedido em Julho de 2008
- Eastwood, A., *ProSteam - A Structured Approach to Steam System Improvement*, Steam Digest 2002, 2002.
URL:<http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/steamdigest2002.pdf>, acedido em Julho de 2008
- Feliciano, A., *Actualização do Modelo Energético da Refinaria do Porto da Petrogal*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.
- Galp Energia, *Galp Energia otimiza sistema refinador para produzir mais 2,5 milhões de toneladas de gasóleo por ano a partir de 2011*, 2007.
URL:http://press.galpenergia.com/galpmedia/vpt/comunicados/refinacao/Com_optimizacaosistemarefinadorGE/, acedido em Julho de 2008
- KBC Newsletter Q1, Steam System Study, 2006.
URL:http://www.kbc.cat.com/default/documents/newsletter/KBC_Newsletter_Q1-2006.pdf, acedido em Julho de 2008
- KBC, 2008. URL:<http://www.kbcenergyservices.com/default.energy.asp?id=138>, acedido em Março de 2008.
- Knight, N., *Implementing a Progressive Strategic Plan for Energy Optimisation*, 2008.
URL:http://www.kbc.cat.com/default/documents/technical%20papers/KBC_ImplementingaProgressivePlanforEnergyOptimisation_FINAL.pdf
- Massa, D.R., García, C.R., Nelson, D., Roseme, G., Meléndez, M.L., Pardos, M.S., Reducing refinery energy costs, *Petroleum Technology Quarterly*, Q1, 103-105 (2006)

- Smith, J.M., Van Ness, H.C., Abbott, M.M., *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*, Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000.
- Smith, R., *Chemical Process Design and Integration*. John Wiley and Sons, 2005.
- Worrell, E., Galitsky, C., *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Petroleum Refineries*, Berkeley, 2005.

URL:<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/862119-046xQA/>, acedido em Julho de 2008.

Anexo 1 Metodologia para o cálculo da eficiência de turbinas a vapor

A metodologia desenvolvida para o cálculo da eficiência de turbinas a vapor encontra-se detalhadamente descrita abaixo para as unidades do sistema internacional:

1. Sabendo a pressão (P_1) e temperatura (T_1) de entrada do vapor, calcula-se a entalpia (H_1) e a entropia (S_1) recorrendo respectivamente às funções $HPT(P_1; T_1; LM_SteamConfig)$ e $SPT(P_1; T_1; LM_SteamConfig)$ contidas no ProSteam.
2. Com a pressão (P_2) de saída do vapor, estima-se a entropia de vapor saturado (S^v), recorrendo à função contida no ProSteam, $SSatPQ(P_2; x^v; LM_SteamConfig)$, introduzindo o valor 1 para a qualidade (x^v) pois trata-se de vapor.
3. Comparar S^v com S_1
 - 3.1 Se $S^v < S_1$, o estado de saída do vapor da turbina corresponde a vapor sobreaquecido (Smith, 2000).
 - 3.1.1 Assumindo que o processo de expansão do vapor dentro da turbina é um processo reversível e adiabático, ou seja isentrópico, a entropia nas condições de saída (S'_2) é igual à entropia nas condições de entrada ($S'_2 = S_1$). Com S'_2 e P_2 calcular a entalpia isentrópica nas condições de saída (H'_2) recorrendo à função $HPS(P_2; S'_2; LM_SteamConfig)$ contida no ProSteam.
 - 3.2 Se $S^v > S_1$, à saída da turbina existe uma mistura de líquido saturado e vapor saturado (Smith, 2000).
 - 3.2.1 Mais uma vez assumindo que o processo de expansão do vapor dentro da turbina é isentrópico, $S'_2 = S_1$. Com P_2 calcular a entropia de líquido saturado (S^l) e vapor saturado (S^v), recorrendo à função contida no ProSteam, $SSatPQ(P_2; x^v; LM_SteamConfig)$, introduzindo respectivamente os valores 0 e 1 para x^v .

3.2.2 Com S_2' , S^l e S^v calcular a qualidade para as condições isentrópicas (x_2') através da Equação A1.1 (Smith, 2000).

$$x_2' = \frac{S_2' - S^l}{S^v - S^l} \quad (\text{A1.1})$$

3.2.3 Com P_2 , calcular a entalpia de líquido saturado (H^l) e vapor saturado (H^v) recorrendo à função do ProSteam, HSatPQ(P_2 ; x^v ; LM_SteamConfig).

3.2.4 Com x_2' , H^l e H^v , calcular a entalpia isentrópica nas condições de saída, recorrendo à Equação A1.2 (Smith, 2000).

$$H_2' = H^l + x_2'(H^v - H^l) \quad (\text{A1.2})$$

4. Com H_1 e H_2' , calcular a variação de entalpia ($(\Delta H)_s$) associada à expansão isentrópica do vapor dentro da turbina através da Equação A1.3 (Smith, 2000).

$$(\Delta H)_s = H_1 - H_2' \quad (\text{A1.3})$$

5. Posteriormente calcular a eficiência (η_{TV}) da turbina a vapor

5.1 Se a temperatura de saída do vapor (T_2) se encontrar disponível, calcular a entalpia real de saída do vapor (H_2) através da função contida no ProSteam HPT(P_2 ; T_2 ; LM_SteamConfig).

5.1.1 Calcular a eficiência com recurso à Equação A1.4 (Smith, 2000).

$$\eta_{TV} = \frac{H_1 - H_2}{(\Delta H)_s} \quad (\text{A1.4})$$

5.2 Se T_2 não se encontrar disponível e se forem conhecidos o trabalho real da turbina (potência, W_s) e o caudal mássico de vapor (\dot{m}_{TV}), a eficiência é calculada com recurso à Equação A1.5.

$$\eta_{TV} = \frac{W_s}{(\Delta H)_s \times \dot{m}_{TV}} \quad (\text{A1.5})$$

5.3 Se T_2 e \dot{m}_{TV} não se encontrarem disponíveis e se for conhecido o consumo específico de vapor (SSC), a eficiência é calculada recorrendo à Equação A1.6.

$$\eta_{TV} = \frac{1}{(\Delta H)_s \times SSC} \quad (A1.6)$$

Anexo 2 Determinação da curva de consumo de vapor de uma turbina a vapor

Sempre que a informação relativa à curva de consumo de vapor de uma turbina se encontrava disponível, esta foi ajustada de forma a obter uma relação entre o caudal mássico de vapor necessário e a potência produzida ($\dot{m}_{TV} = f(W_s)$).

Na Figura A2.1 encontra-se ilustrada a curva de consumo de vapor da turbina PT-4002 A retirada da sua folha de dados.

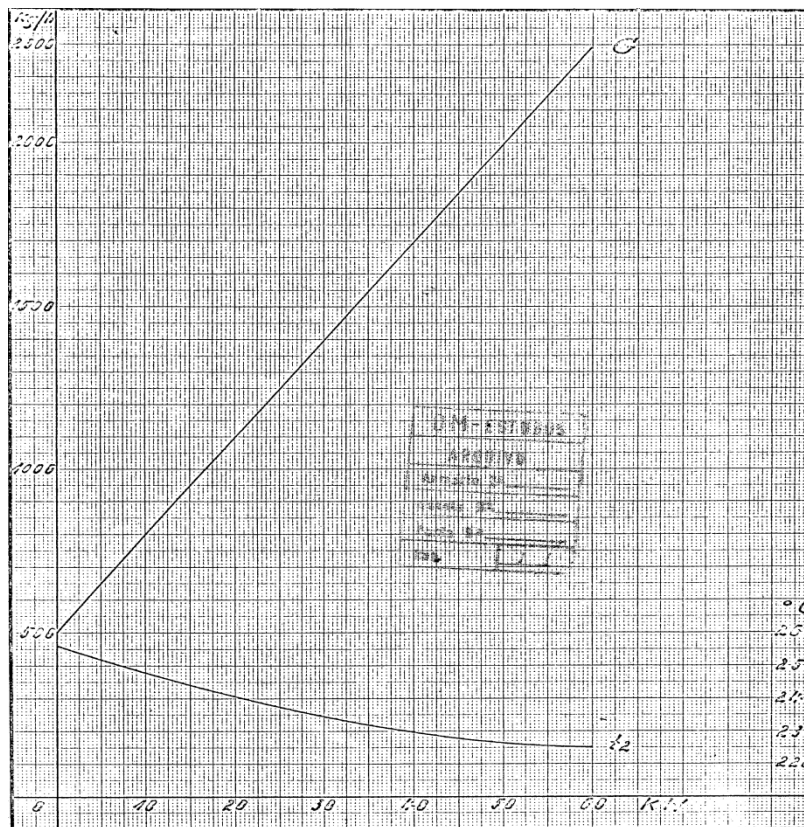


Figura A2.1 - Curva de consumo de vapor da turbina PT-4002 A.

A Figura A2.2 apresenta a equação de interpolação da curva de consumo de vapor para esta turbina.

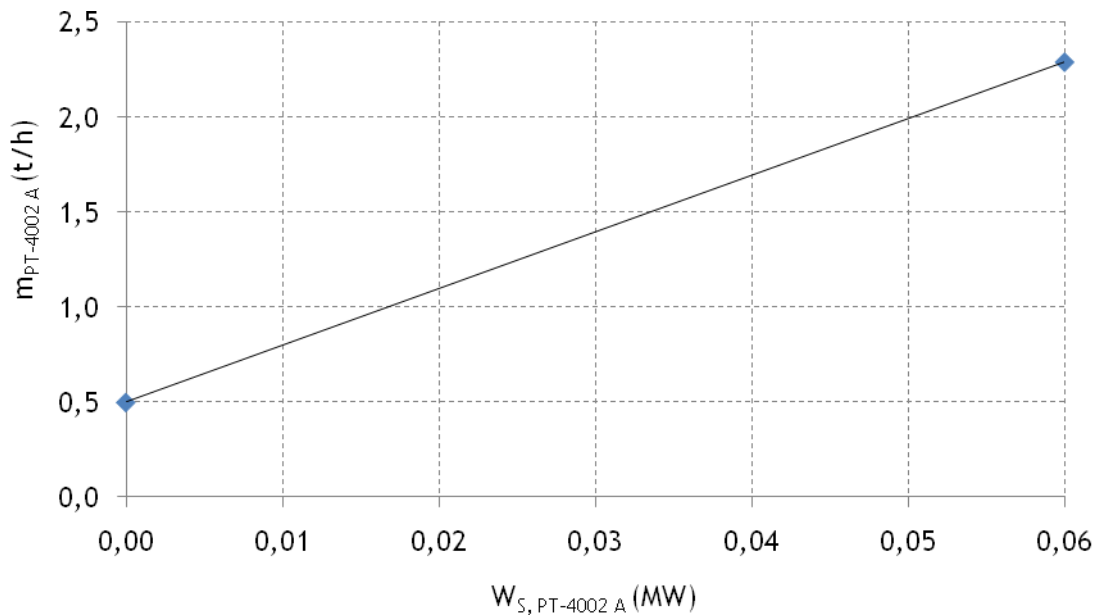


Figura A2.2 - Equação de interpolação da curva de consumo de vapor da turbina PT-4002 A.

$$\left(\dot{m}_{PT-4002A} = 29,867 \times W_{S, PT-4002A} + 0,500\right), \text{ com } \dot{m}_{PT-4002A} \text{ em } t/h \text{ e } W_{S, PT-4002A} \text{ em } MW .$$

Esta equação é introduzida no campo “Required Power” da folha “Drivers Efficiency” de forma a que o caudal mássico de vapor seja uma variável calculada pelo modelo e não introduzida pelo utilizador.

Anexo 3 Ajuste de uma curva de potência de uma bomba centrífuga

A Figura A3.1 apresenta a curva de potência da bomba P-4101 F, retirada da sua folha de dados.

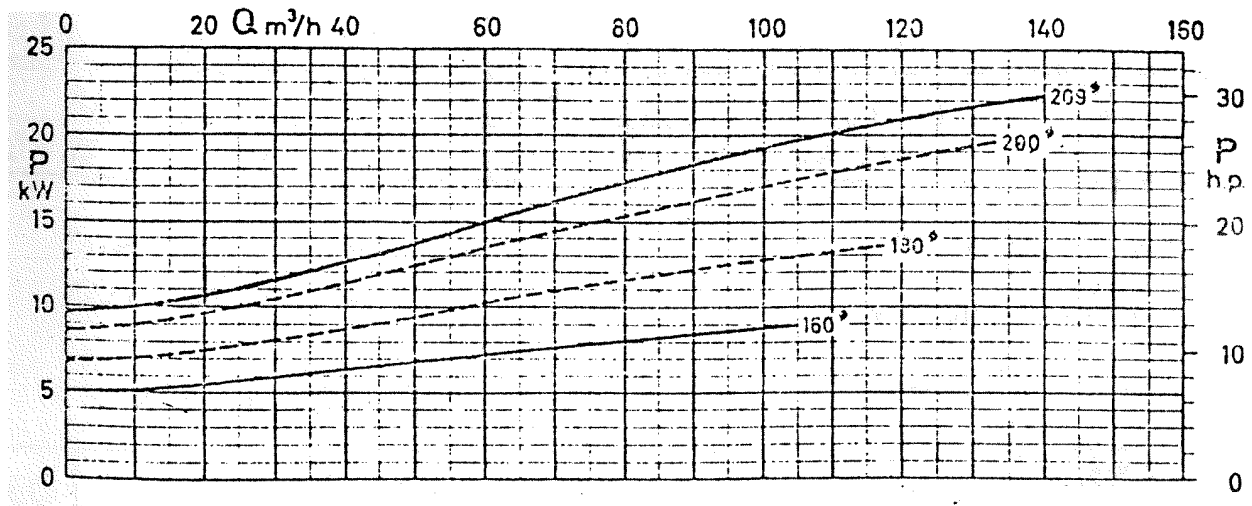


Figura A3.1 - Curva de potência da bomba P-4101 F para uma velocidade de rotação de 2900 rpm.

De acordo com os dados de projecto desta bomba, referidos na sua folha de dados, esta possui um impulsor com um diâmetro de 188 mm e funciona a uma velocidade de rotação de 2920 rpm. No entanto não se encontra disponível a curva de potência para estas condições, logo é necessário obter uma estimativa. Assim partindo da curva de potência para o impulsor de 180 mm de diâmetro e para uma velocidade de rotação de 2900 rpm (condição inicial) e recorrendo às Equações A3.1 e A3.2 (Benaroya, 1978) foi possível determinar a curva de potência para a condição final pretendida.

$$\frac{P_{Eixo,2}}{P_{Eixo,1}} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3 \quad (A3.1)$$

Em que $P_{Eixo,2}$ é a potência no eixo e D_2 o diâmetro do impulsor ambos para a condição final e $P_{Eixo,1}$ é a potência no eixo e D_1 o diâmetro do impulsor ambos para a condição inicial.

$$\frac{P_{Eixo,2}}{P_{Eixo,1}} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \quad (A3.2)$$

Em que N_2 e N_1 são respectivamente as velocidades de rotação para a condição inicial e final.

De notar que estas equações assumem que as eficiências são iguais para ambas as condições. Esta estimativa será mais aproximada quanto menor for a razão D_2/D_1 e N_2/N_1 . Sempre que as condições para as quais foi determinada a curva de potência da bomba diferiam das condições de projecto, foi efectuada esta correcção de forma a obter uma estimativa da curva de potência para estas condições.

A Figura A3.2 ilustra a curva de potência para a condição final e o respectivo ajuste.

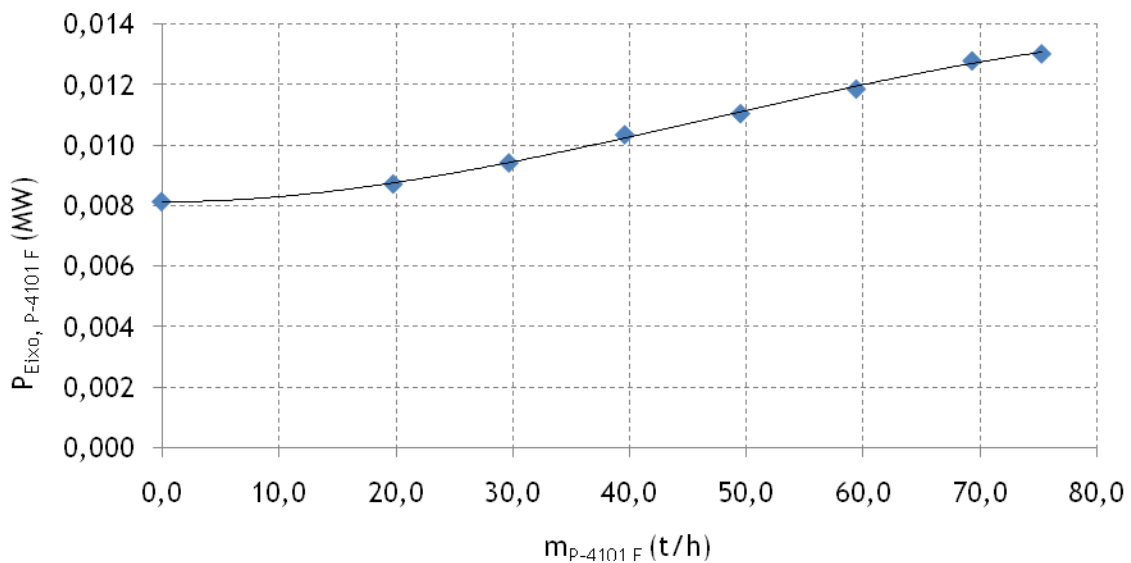


Figura A3.2 - Curva de potência da bomba P-4101 F para a condição final pretendida e respectiva equação de ajuste.

$$(P_{Eixo, P-4101 F} = -1,325 \times 10^{-8} \dot{m}_{P-4101 F}^3 + 1,870 \times 10^{-6} \dot{m}_{P-4101 F}^2 - 9,920 \times 10^{-8} \dot{m}_{P-4101 F} + 8,133 \times 10^{-3},$$

com $P_{Eixo, P-4101 F}$ em MW e $\dot{m}_{P-4101 F}$ em t/h, $R^2 = 0,999$).

Anexo 4 Metodologia de cálculo utilizada no desenvolvimento da folha de cálculo “Cogeneration”

A metodologia utilizada no desenvolvimento da folha de cálculo “Cogeneration” encontra-se descrita abaixo para as unidades do sistema internacional. De referir que se trata de uma estimativa, visto que à data da realização deste trabalho não se encontravam disponíveis os dados necessários a uma determinação mais rigorosa.

4.1 Cálculo do consumo total anual de combustível

Aqui encontra-se descrita a metodologia de cálculo utilizada para determinar o consumo total anual de combustível.

1. Com a potência eléctrica de ambas as turbinas a gás (W_{TG}) e assumindo uma eficiência associada à geração de energia eléctrica (η_{TG}) de 0,3 (30%), determinar a energia necessária contida no combustível (W_C) expressa em unidades de potência. Recorrendo para isso à Equação A4.1.

$$W_C = \frac{W_{TG}}{\eta_{TG}} \quad (A4.1)$$

2. Com W_C e W_{TG} , determinar o calor disponível para transferência de calor nas caldeiras de recuperação de calor (HRSG, Q_{Ex}), recorrendo à Equação A4.2.

$$Q_{Ex} = W_C - W_{TG} \quad (A4.2)$$

3. Sabendo Q_{Ex} e assumindo uma eficiência (η_{HRSG}) de 0,7 (70%) para as caldeiras de recuperação de calor, determinar o calor transferido (Q_{HRSG}) para a água de alimentação às caldeiras de forma a produzir vapor de alta pressão. Recorrendo para isso à Equação A4.3.

$$Q_{HRSG} = Q_{Ex} \eta_{HRSG} \quad (A4.3)$$

4. Posteriormente efectuar o balanço material e energético à caldeira de recuperação de calor de forma a determinar o calor necessário (Q) para produzir o caudal mássico necessário de vapor de alta pressão para a RPP (\dot{m}_{Vapor}).

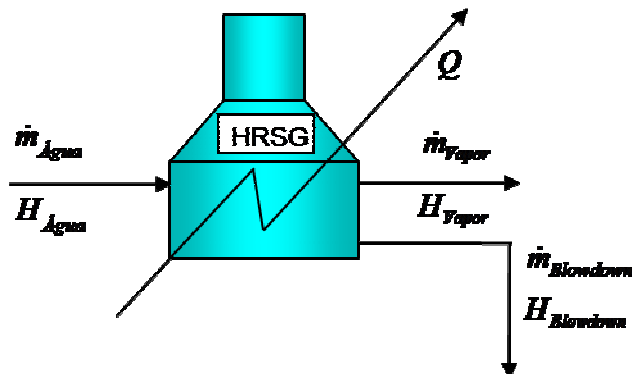


Figura A4.1 - Esquema das correntes de entrada e de saída de uma caldeira de recuperação de calor.

4.1 Do balanço material obtém-se:

$$\dot{m}_{\text{Água}} = \dot{m}_{\text{Vapor}} + \dot{m}_{\text{Blowdown}} \quad (\text{A4.4})$$

Em que: $\dot{m}_{\text{Água}}$ - Caudal mássico da corrente de água de alimentação às caldeiras.

$\dot{m}_{\text{Blowdown}}$ - Caudal mássico da corrente de *blowdown*.

4.1.1 Assumindo que $\dot{m}_{\text{Blowdown}}$ é igual a 3 % (x_{Blowdown}) de \dot{m}_{Vapor} .

$$\dot{m}_{\text{Blowdown}} = x_{\text{Blowdown}} \dot{m}_{\text{Vapor}} \quad (\text{A4.5})$$

4.1.2 Substituindo a Equação A4.5 na Equação A4.4 e rearranjando obtém-se a Equação A4.6.

$$\dot{m}_{\text{Água}} = (1 + x_{\text{Blowdown}}) \dot{m}_{\text{Vapor}} \quad (\text{A4.6})$$

4.2 Do balanço energético sabe-se que:

$$Q = \dot{m}_{Vapor} H_{Vapor} + m_{Blowdown} H_{Blowdown} - \dot{m}_{\acute{a}gua} H_{\acute{a}gua} \quad (A4.7)$$

Em que: H_{Vapor} - Entalpia do vapor de alta pressão produzido.

$H_{Blowdown}$ - Entalpia da corrente de *blowdown*.

$H_{\acute{a}gua}$ - Entalpia da corrente de água de alimentação às caldeiras.

4.2.1 Substituindo a Equação A4.6 na Equação A4.7, obtém-se a Equação A4.8.

$$Q = (H_{Vapor} + x_{Blowdown} H_{\acute{a}gua} - (1 + x_{Blowdown}) H_{\acute{a}gua}) \dot{m}_{Vapor} \quad (A4.8)$$

5. Sabendo \dot{m}_{Vapor} , determinar $\dot{m}_{Blowdown}$ e $\dot{m}_{\acute{a}gua}$ através das Equações A4.5 e A4.6, respectivamente.
6. De forma a avaliar a necessidade de uma queima suplementar nas caldeiras de recuperação de calor de forma a produzir o caudal mássico necessário de vapor de alta pressão (\dot{m}_{Vapor}), calcular Q .
7. Comparar Q com Q_{HRSG}

7.1 Se $Q > Q_{HRSG}$, existe necessidade de uma queima suplementar nas caldeiras de recuperação de calor.

7.1.1 Calcular o défice de calor ($Q_{Défice}$) com recurso à Equação A4.9.

$$Q_{Défice} = Q - Q_{HRSG} \quad (A4.9)$$

7.1.2 Calcular a energia adicional contida no combustível associado à queima suplementar (Q_C), expresso em unidades de potência, com recurso à Equação A4.10.

$$Q_C = \frac{Q_{Défice}}{\eta_{HRSG}} \quad (A4.10)$$

7.2 Se $Q \leq Q_{HRSG}$, não é necessário uma queima suplementar nas caldeiras de recuperação de calor.

8. Assumindo que o gás natural a utilizar na futura unidade de Cogeração apresenta a composição do gás natural contido na folha “Compositions” do modelo energético, calcular o seu poder calorífico inferior (PCI_C), com recurso à função Fuel_LHV(Fuel; LM_SteamConfig), do ProSteam.
9. Com W_C e o PCI_C , calcular o caudal mássico de combustível (\dot{m}_C) consumido por ambas as turbinas a gás, através da Equação A4.11.

$$\dot{m}_C = \frac{W_C}{PCI_C} \quad (A4.11)$$

10. Se existir queima suplementar de combustível nas caldeiras de recuperação de calor, com Q_C e o PCI_C , calcular o caudal mássico de combustível ($\dot{m}_{Défice}$) consumido devido a essa queima, com recurso à Equação A4.12.

$$\dot{m}_{Défice} = \frac{Q_{Défice}}{PCI_C} \quad (A4.12)$$

11. Com \dot{m}_C e $\dot{m}_{Défice}$, calcular o caudal mássico total de combustível ($\dot{m}_{C,total}$) consumido pela futura unidade de Cogeração, através da Equação A4.13.

$$\dot{m}_{C,total} = \dot{m}_C + \dot{m}_{Défice} \quad (A4.13)$$

4.2 Cálculo da potência eléctrica fornecida para a RPP e para a REN

Aqui será descrita a metodologia de cálculo associada à energia eléctrica vendida anualmente para a RPP e para a REN.

1. Com a necessidade local de potência eléctrica (P_{Local}), e a potência eléctrica produzida pelo Turbogruppo TG-4003 ($P_{TG-4003}$), calcular a potência eléctrica fornecida pela futura unidade de Cogeração para a RPP (P_{RPP}), através da Equação A4.14.

$$P_{RPP} = P_{Local} - P_{TG-4003} \quad (A4.14)$$

2. Assumindo uma potência eléctrica consumida internamente por esta unidade ($P_{Consumida,Cogeração}$) de 0,50 MW e sabendo W_{TG} e P_{RPP} , calcular a potência eléctrica fornecida pela futura unidade de Cogeração para a REN (P_{REN}), com recurso à Equação A4.15.

$$P_{REN} = W_{TG} - P_{RPP} - P_{Consumida,cogeração} \quad (A4.15)$$

4.3 Cálculo da eficiência energética global da unidade de Cogeração

1. Com W_{TG} , Q , W_C e Q_C , é possível determinar a eficiência energética global da unidade de Cogeração ($\eta_{Cogeração}$), com recurso à Equação 4.16.

$$\eta_{Cogeração} = \frac{W_{TG} + Q}{W_C + Q_C} \quad (A4.16)$$

4.4 Cálculo do vapor produzido, combustível consumido e energia eléctrica fornecida para a RPP e REN na base anual

1. Sabendo o período anual de laboração ($t_{Laboração,anual}$).

1.1 E com \dot{m}_{Vapor} , calcular a quantidade anual de vapor produzido ($\dot{m}_{Vapor,anual}$), através da Equação A4.17.

$$\dot{m}_{Vapor,anual} = \dot{m}_{Vapor} t_{Laboração,anual} \quad (A4.17)$$

1.2 Sabendo a composição do gás natural, calcular o seu peso molecular (M_C), através da função Fuel_MW(Fuel; LM_SteamConfig), do ProSteam.

1.2.1 Com o volume molar de gás (V_M) a PTN (condições normais de pressão e temperatura, 0°C e 1 atm) e com \dot{m}_C e $\dot{m}_{Défice}$, calcular o volume anual de combustível consumido nas condições PTN. Recorrendo às equações A4.18 e A4.19, para calcular o volume anual consumido de combustível, nas turbinas a gás ($V_{C,TG}$) e nas queimas suplementares nas caldeiras de recuperação de calor ($V_{C,défice}$), respectivamente. Em que o volume anual total consumido ($V_{C,total}$) é a soma das duas parcelas anteriores.

$$V_{C,TG} = \frac{\dot{m}_C V_M}{M_C} t_{Laboração,anual} \quad (A4.18)$$

$$V_{C,défice} = \frac{\dot{m}_{Défice} V_M}{M_C} t_{Laboração,anual} \quad (A4.19)$$

1.3 Com P_{RPP} e P_{REN} é possível determinar a energia eléctrica anual, fornecida para a RPP (EE_{RPP}) e para a REN (EE_{REN}), através das Equações A4.20 e A4.21, respectivamente.

$$EE_{RPP} = P_{RPP} t_{Laboração,anual} \quad (A4.20)$$

$$EE_{REN} = P_{REN} t_{Laboração,anual} \quad (A4.21)$$