

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

RAMO OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA QUÍMICA



Integração Energética da Unidade 2100 da Fábrica de Óleos Base da Refinaria de Matosinhos

Nádia Filipa Rodrigues Afonso

Novembro de 2010

Orientador: Prof. Doutor Gilberto António Pinto

Agradecimentos

Após a realização deste projecto gostaria de agradecer a todos aqueles que me ajudaram na realização e conclusão deste projecto.

Gostaria de agradecer particularmente ao meu orientador académico, Professor Gilberto Pinto, por todo o tempo, prontidão e entusiasmo que disponibilizou na análise e realização deste projecto, bem como na motivação que me inculuiu.

Ao Eng.^o Carlos Reis e à Eng.^a Andreia Costa da Galp Energia S.A. - Refinaria de Matosinhos, pela oportunidade que me concederam e pela disponibilidade e apoio que sempre manifestaram.

Em último agradeço aos meus pais, a quem tudo devo, à minha família, aos meus amigos, em especial à Cátia e finalmente ao José Carlos que sempre me apoiou e continua a transmitir-me todo o carinho e força na conquista dos meus objectivos.

Resumo

Até 2020, a Europa terá de reduzir 20% das suas emissões de gases com efeito de estufa, 20% da produção de energia terá de ser proveniente de fontes renováveis e a eficiência energética deverá aumentar 20%. Estas são as metas apresentadas pela União Europeia, que ficaram conhecidas por 20/20/20 [1].

A Refinaria de Matosinhos é um complexo industrial que opera no sector da refinação e que apresenta preocupações ao nível da eficiência energética e dos aspectos ambientais subjacentes.

No âmbito da racionalização energética das refinarias, a Galp Energia tem vindo a implementar um conjunto de medidas, adoptando as melhores tecnologias disponíveis com o objectivo de diminuir os consumos de energia, promover a eficiência energética e reduzir as emissões de dióxido de carbono. Para ir de encontro a estas medidas foi elaborado um estudo comparativo que permitiu à empresa definir as medidas consideradas prioritárias. Uma solução encontrada visa a execução de projectos que não requerem investimento e que têm acções imediatas, tais como o aumento da eficiência energética das fornalhas [1].

Este trabalho realizado na Galp Energia S.A. teve como objectivo principal a optimização energética da Unidade de Desalfatação do Propano da Fábrica de Óleos Base. Esta optimização baseou-se no aproveitamento energético da corrente de fundo da coluna de rectificação T2003C com uma potência calorífica de 2,79 Gcal/h.

Após levantamento de todas as variáveis do processo relativas a esta unidade, especialmente a potência calorífica das correntes envolvidas chegou-se à conclusão que a fornalha H2101 poderá ser substituída por dois permutadores, reduzindo desta forma os consumos energéticos. Pois a corrente de fundo da coluna T2003 com uma potência calorífica 2,79 Gcal/h poderá permutar calor com a corrente da mistura asfalto com propano, fazendo com que esta atinja temperatura superior à obtida com a fornalha em funcionamento.

A análise económica ao consumo e respectivo custo do fuelóleo na fornalha para o período de um ano foi realizada, sendo o seu custo de combustível de 611.396,00 €. O valor da aquisição dos permutadores é 86.355,97€, sendo rentável a alteração proposta neste projecto.

Palavras – Chave: Refinação, Integração Energética, Balanços Energéticos, Fornalha, Permutadores de Calor.

Abstract

By 2020, Europe will have to reduce 20% of their emissions of greenhouse gases, 20% of energy production must be from renewable sources and energy efficiency should increase by 20%. These are the goals submitted by the European Union, which became known for 20/20/20 [1].

The Matosinhos Refinery is an industrial complex that is active in refining and presenting concerns at the level of energy efficiency and environmental issues underlying them.

In the context of energy rationalization of refineries, Galp Energia has been implementing a series of measures, by adopting best available technologies with the goal of lowering energy consumption, promote energy efficiency and reduce emissions of carbon dioxide. To meet these measures was drawn up a comparative study that allowed the company to define the measures identified as priorities. A solution is aimed at implementing projects that do not require investment and that have immediate actions, such as increasing the energy efficiency of furnaces [1].

This work performed at Galp Energia's main global was to optimize energy unit of Desasfaltação Propane Factory Oil Base. This optimization was based on current energy use background T2003C rectifying column with a heat output of 2.79 Gcal/h.

After surveying all process variables related to this unit, especially the heat output of the currents involved came to the conclusion that the furnace H2101 may be replaced by two heat exchangers, thereby reducing energy consumption. For the current bottom of the column with a thermal T2003C 2,79 Gcal/h may exchange heat with the flow of asphalt mixture with propane, so it reaches higher temperature than that obtained with the furnace running.

The economic analysis of consumption and the cost of fuel in the furnace for a period of one year was performed, and its fuel cost of € 611.396,00. The acquisition of heat exchangers is € 86,355.97, being profitable in the proposed amendment in this project.

Keywords: Refining, Energy Integration, Energy Balances, Furnaces, Heat Exchangers.

Índice

1.Introdução	1
1.1. Contextualização – A empresa -Galp Energia S.A. – Refinaria de Matosinhos	1
2. A refinação	3
2.1. Composição do petróleo	3
2.2. O processo de refinação	4
2.3. Princípio de funcionamento de fornalhas	6
2.4. Princípio de funcionamento de permutador de calor	9
2.4.1. Permutador de carcaça e tubos	9
3. Contextualização	12
3.1. A empresa – Galp Energia S.A – Refinaria de Matosinhos	12
3.2. Fábrica de Óleos Base	18
3.2.1. Unidades processuais da FOB	18
3.3. A Unidade 2100	20
3.3.1 Descrição do processo	20
4. Descrição do Problema	23
5. Resultados Calculados	24
5.1. Dimensionamento do permutador de carcaça e tubos	24
5.1.1. Permutador de calor vapor/corrente de reciclo	28
5.1.2. Permutador de calor mistura asfalto com propano/corrente de reciclo	38
6. Análise Económica	49
6.1. Plano de investimento	50
7. Discussão/Conclusão	53
Referências bibliográficas	54
Anexos	

Índice de Figuras

Figura 1: Vista Panorâmica da refinaria do Porto	2
Figura 2: Refino do petróleo: torre de fraccionamento do petróleo	3
Figura 3: Esquema representativo de diferentes tipos de fornalhas verticais	6
Figura 4: Fornalha típica de uma refinaria	8
Figura 5: Esquema de um permutador de carcaça e tubos	10
Figura 6: Fábrica de Óleos Base.	13
Figura 7: Fábrica de utilidades.	14
Figura 8: Fábrica de combustíveis.	15
Figura 9: Fábrica de aromáticos.	16
Figura 10: Fábrica de lubrificantes.	17
Figura 11: Esquema do funcionamento da Unidade 2100 com o aproveitamento da corrente de fundo.	23
Figura 12: Esquema do permutador de aquecimento da alimentação da corrente da fornalha com a corrente de reciclo	25
Figura 13: Processo da unidade 2100 com a extinção da fornalha e substituição desta por dois permutadores de carcaça e tubos	48
Figura C.1: Folga entre o invólucro e o feixe para permutadores de carcaça e tubos.	A-5
Figura C.2: Factor de transferência de calor para o fluido no interior dos tubos.	A-6
Figura C.3: Factor de atrito para o fluido no interior dos tubos.	A-6
Figura C.4: Factor de transferência de calor para o fluido que circula perpendicularmente a um feixe de tubos.	A-7
Figura C.5: Factor de correcção para a passagem esquiva para a transferência de calor.	A-7
Figura C.6: R_a (e $R'a$) e θ_b em função do corte.	A-8
Figura C.7: Factor de correcção para a janela para a transferência de calor	A-8
Figura C.8: Parâmetro βL para o cálculo do factor de correcção para as fugas para a transferência de calor.	A-9
Figura C.9: Factor de atrito para um fluido a escoar perpendicularmente a um feixe de tubo	A-9
Figura C.10: Factor de passagem esquiva para a queda de pressão	A-10

Figura C.11: Parâmetro para calcular o factor de correcção para fugas para a queda de pressão A-10

Índice de tabelas

Tabela 1 - Fábricas e respectivas capacidades de produção da refinaria de Matosinhos	12
Tabela 2 - Dados da H2101 – serviço asfalto c/ propano e sobreaquecedor de vapor	24
Tabela 3 – Propriedades físicas e químicas da corrente de reciclo e do vapor sobreaquecido	28
Tabela 4 – Dados da corrente de reciclo e da corrente da mistura de asfalto c/ propano	38
Tabela 5 – Listagem de equipamento e respectivas quantidades/custos	50
Tabela 6 - Mapa de pagamento do investimento em capital fixo	50
Tabela 7 – Mapa de amortizações e valor contabilístico do equipamento industrial	51
Tabela 8 – Investimento total e respectivos montantes de capitais próprios e alheio	51
Tabela 9 – Plano de reembolso de capital	51
Tabela A.1 – Dados do serviço mistura asfalto com propano e sobreaquecedor de vapor	A-1

Notação e Glossário

ΔH	Varição de entalpia	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$
ΔT	Varição de temperatura	$^\circ\text{C}$
ΔT_m	Temperatura média logarítma	$^\circ\text{C}$
Δp_{cruz}	Queda de pressão na zona de fluxo cruzado	Pa
Δp_{emb}	Queda de pressão nas embocaduras	Pa
Δp_{emb}	Queda de pressão num extremo do permutador	Pa
Δp_{ideal}	Queda de pressão exibida pelo fluido ao atravessar perpendicularmente o feixe de tubos	Pa
Δp_{janela}	Queda de pressão da janela	Pa
Δp_t	Queda de pressão no interior dos tubos	Pa
μ	Viscosidade	N.s/m^2
μ_f	Viscosidade do fluido avaliada à temperatura média	N.s/m^2
μ_s	Viscosidade do fluido na carcaça	N.s/m^2
μ_w	Viscosidade do fluido à temperatura da parede	N.s/m^2
ρ	Massa volúmica	kg/m^3
ρ_f	Massa volúmica do fluido	kg/m^3
ρ_s	Massa volúmica do fluido que circula na carcaça	kg/m^3
A	<i>Área de transferência de calor</i>	m^2
A_b	<i>Área da folga entre o feixe de tubos e o invólucro</i>	m^2
A_L	<i>Área total para as fugas</i>	m^2
A_s	<i>Área máxima para o fluxo cruzado</i>	m^2
A_{sb}	<i>Área da folga entre a chicana e a carcaça</i>	m^2
A_{tb}	<i>Área da folga entre os tubos e a chicana</i>	m^2
A_w	<i>Área da secção da janela</i>	m^2
B_b	<i>Corte do feixe tubular</i>	m
B_c	<i>Corte da chicana</i>	m
C_p	<i>Capacidade calorífica</i>	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$
c_s	<i>Folga entre a chicana e a carcaça</i>	m
c_t	<i>Folga entre a chicana e o tubo</i>	m
D_b	<i>Diâmetro do feixe</i>	m
d_i	Diâmetro interno dos tubos	m
d_o	Diâmetro externo dos tubos	m
D_s	<i>Diâmetro do invólucro</i>	mm
e	Espessura dos tubos	m

F	Factor de correcção de temperaturas	
F_b e F'_b	Factor de correcção para a passagem esquiva	
F_L e F'_L	Factor de correcção para fugas	
F_n	Factor de correcção da linha de tubos	
F_w	Factor de correcção para o efeito da janela	
H_b	Altura desde a corda da chicana até ao cimo do feixe de tubos	m
H_c	Altura do corte de chicana	m
H_e	Entalpia do vapor à entrada	$kJ/kg^\circ C$
h_i	Coeficiente de transferência de calor do fluido que circula no interior dos tubos	$W/m^2^\circ C$
H_s	Entalpia do vapor à saída	$kJ/kg^\circ C$
h_s	Coeficiente de transferência de calor do fluido que circula no ólucro	$W/m^2^\circ C$
h_{oc}	Coeficiente de transferência de calor ideal para escoamento perpendicular aos tubos	$W/m^2^\circ C$
j_h	Factor de transferência de calor	
j_f	Factor de atrito	
k_f	Condutividade térmica do fluido	$W/m.K$
K	Número de cargas cinéticas	
L	Comprimento efectivo dos tubos	m
l_B	Espaçamento entre chicanas	m
M	Factor de correcção	
\dot{m}	Caudal mássico	kg/h
N_b	Número de chicanas num permutador	
N_{cv}	Número de linhas de tubos na zona de fluxo cruzado	
N_p	Número de passagens do lado dos tubos	
N_s	Número de faixas de vedação	
N_t	Número de tubos do permutador	
N_{wv}	Número de filas de tubos na zona da janela	
Pr	Número de Prandtl	
ρ_t	Passo dos tubos	
Q	Potência térmica	W
R_a, R'_a	Quociente entre a área da secção transversal da zona da janela e a área total da secção recta do invólucro.	
Re	Número de Reynolds	

u_{emb}	Velocidade baseada na área da secção transversal da embocadura	m/s
u_i	Velocidade do fluido no interior dos tubos	m/s
u_s	Velocidade do fluido no lado do invólucro	m/s
u_w	Velocidade do fluido na zona da janela	m/s

1.Introdução

A energia é cada vez mais uma necessidade 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.

No sector de refinação, os custos associados à energia são muito elevados e 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.

No âmbito da racionalização energética das refinarias, a Galp Energia tem vindo a implementar um conjunto de medidas, adoptando as melhores tecnologias disponíveis com o objectivo de diminuir os consumos de energia, promover a eficiência energética e reduzir as emissões de dióxido de carbono. Para ir de encontro a estas medidas foi elaborado um estudo comparativo que permitiu à empresa definir as medidas consideradas prioritárias. Uma solução encontrada visa a execução de projectos que não requerem investimento e que têm acções imediatas, tais como o aumento da eficiência das fornalhas [1].

1.1 Contextualização - A Empresa – Galp Energia S.A – Refinaria de Matosinhos

A Refinaria do Porto, inaugurada em 1969, insere-se num complexo industrial localizado entre a Boa Nova e o Cabo do Mundo. Situa-se a 3 km a Norte do Porto de Leixões (interface para importação de petróleo bruto e alguns produtos refinados, assim como exportação de alguns produtos). Possui uma área aproximada de 290 hectares interligada ao terminal para petroleiros no porto de Leixões por vários oleodutos com aproximadamente 2 km de extensão.



Figura 1 : Vista Panorâmica da refinaria do Porto

A Refinaria de Matosinhos produz uma grande variedade de produtos necessários para abastecer o mercado. Os derivados ou produtos aromáticos, são importantes matérias-primas para a indústria química e petroquímica, para a produção de plástico, têxteis, adubos, borrachas, tintas, solventes, etc. Todos os produtos cumprem elevados os padrões de qualidade, respeitando todas as exigências do mercado.

2. A refinação

2.1 Composição do Petróleo

O Petróleo é a matéria-prima maioritária nos combustíveis que utilizamos. É um combustível fóssil constituído, essencialmente, por uma mistura de hidrocarbonetos (moléculas constituídas por carbono e hidrogénio), mas que contém, também, derivados de enxofre e de azoto, sais e até alguma água.

Os hidrocarbonetos, os quais constituem a maior percentagem do petróleo, eles podem agrupar-se da seguinte forma:

- Parafinas (hidrocarbonetos lineares ou ramificados de fórmula C_nH_{2n+2} , normalmente com 1 a 20 átomos de carbono).
- Aromáticos são hidrocarbonetos com estruturas em anel (anel benzeno com 6 átomos de carbono e ligações duplas alternadas), com um ou mais anéis por molécula.
- Cicloalcanos são hidrocarbonetos com estrutura em anel mas sem ligações duplas (C_nH_{2n}) e com um ou mais anéis por molécula.
- Alquenos são hidrocarbonetos lineares ou ramificados com ligações duplas (C_nH_{2n}).

A composição do petróleo varia dependendo da zona do globo, e consoante a zona onde é extraído, a sua composição a cor (normalmente acastanhada) e a viscosidade do petróleo podem variar, assim como o seu poder calorífico (petróleos leves e pesados). Os hidrocarbonetos são compostos que armazenam uma grande quantidade de energia.

Em média, pode dizer-se que o petróleo contém cerca de:

- 84% de Carbono
- 14 % de Hidrogénio
- 1-3 % de enxofre
- <1% de Azoto
- <1% de Oxigénio
- <1% de metais
- <1% de Sais

2.2 Processo de refinação

O petróleo bruto tem que passar por um processo de refinação antes de ser consumido. Este processo envolve uma série de tratamentos físicos e químicos que visam a separação do petróleo bruto em numerosos componentes, designados por derivados. De acordo com as características do petróleo bruto, escolhe-se um entre os vários processos de refinação. Contudo, há passos obrigatórios seguidos por qualquer processo.

O petróleo bruto é inicialmente submetido à destilação fraccionada. Esta técnica, consiste no aquecimento do petróleo bruto e posterior condução à parte inferior da coluna de destilação. No interior da coluna estão dispostos uma série de pratos colocados a diferentes alturas. Quando o petróleo é aquecido até à sua temperatura de ebulição liberta vapores que sobem pela coluna através de tubos soldados aos pratos e cobertos por campânulas, de maneira que os vapores são forçados a borbulhar através do líquido contido nos pratos.

Os componentes orgânicos mais voláteis (de baixo ponto de ebulição,) ascendem continuamente pela coluna de fraccionamento em direcção ao topo da coluna, que é a parte mais fria, até condensarem. Os componentes de elevado ponto de ebulição são condensados em diferentes alturas da coluna e retrocedem para baixo. Desta maneira consegue-se que, a uma determinada altura da coluna, a temperatura seja sempre a mesma, e que o líquido condensado em cada prato tenha sempre a mesma composição química. Esses produtos de composição química definida chamam-se fracções e são formadas, principalmente, por gás metano, gasolina, petróleo e gasóleo. Na base da coluna de fraccionamento, onde a temperatura é mais elevada, fica um resíduo que ainda contém fracções voláteis. Se, para estas serem recuperadas, o resíduo for aquecido a temperaturas ainda mais elevadas, ele decompõe-se.

Como tal, para que a destilação prossiga, o resíduo é transportado por meio de bombas para outra coluna, onde, sob uma pressão reduzida próxima do vácuo, continua em ebulição a uma temperatura mais baixa, não destrutiva, e as fracções vaporizam-se.

Esta destilação adicional decompõe o resíduo em óleo diesel ("fuel-oil"), óleo lubrificante, asfalto (piche) e cera parafínica. A destilação constitui uma separação, puramente física das diferentes substâncias misturadas no petróleo bruto. Deste modo, a destilação não altera a estrutura das moléculas e, assim sendo, as substâncias conservam a sua identidade química. Para a obtenção de maior número e variedade de produtos, as fracções mais pesadas são partidas em fracções leves pelo processo de Cracking. Este processo consiste, na decomposição das moléculas

grandes das substâncias pesadas por acção de calor e/ou por catálise, cujo ponto de ebulição é elevado, para obter substâncias constituídas por moléculas de tamanho menor e que correspondem a substâncias mais voláteis, logo com ponto de ebulição mais baixo. Deste modo, por exemplo, o fuel-oil (óleo combustível pesado) pode ser convertido em gasolina.

O processo oposto ao cracking chama-se polimerização e consiste, essencialmente, em combinar moléculas pequenas de derivados do petróleo para formar outras maiores e mais pesadas, por exemplo os "plásticos". Os processos de destilação do petróleo variam conforme a procura de mercado dos diferentes produtos. As fracções obtidas podem ser, posteriormente, misturadas umas às outras para a obtenção de produtos com as propriedades desejadas.

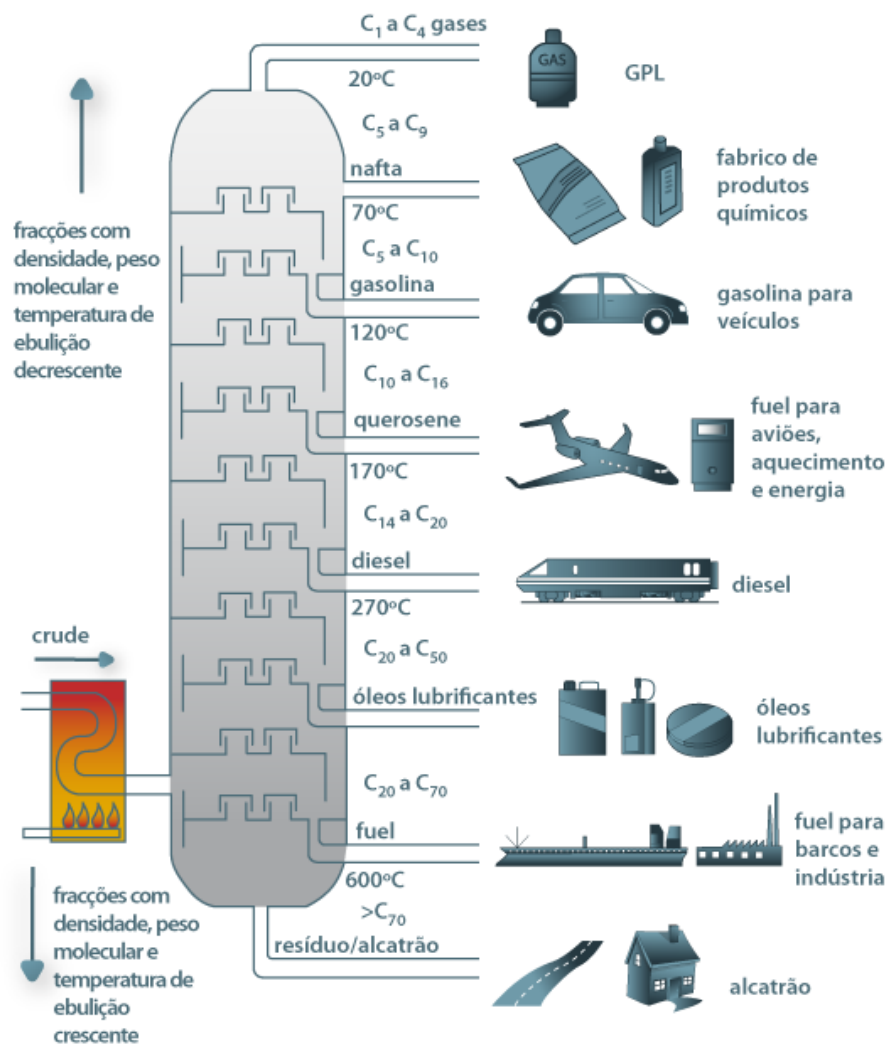


Figura 2: Refino do petróleo: Torre de fraccionamento do petróleo [8]

Num processo de refinação são vários os equipamentos intervenientes desde equipamentos com fim energético até equipamentos onde se efectuam processos de separação tais como a destilação.

No decorrer deste trabalho os equipamentos que merecem maior destaque são então os equipamentos com aplicações energéticas tais como as fornalhas e os permutadores de calor.

2.3 Princípio de funcionamento de fornalhas

As fornalhas são muito utilizadas no contexto industrial, e são usadas para o aquecimento de correntes com elevados caudais para elevadas temperaturas. O calor é fornecido directamente pela queima de combustível. A potência varia entre 3 e 100 MW, sendo as suas principais aplicações: (i) Aquecimento de correntes de processos, (ii) Reebulidores para colunas, (iii) Reactores de aquecimento directo, (iv) Reformadores para produção de hidrogénio e (v) Caldeiras de vapor.

Existem diferentes tipos de fornalhas, de acordo com a sua finalidade.

Na Figura 3 apresenta-se a representação esquemática três diferentes tipos de fornalha

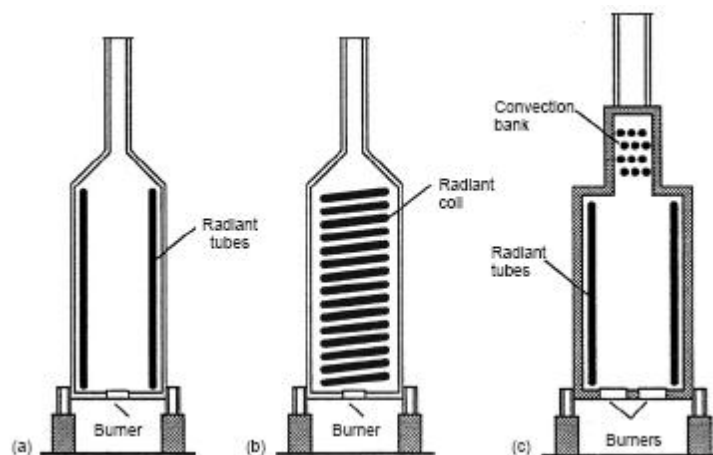


Figura 3: Esquema representativo de diferentes tipos de fornalhas verticais **a)** com secção de radiação; **b)** com secção de radiação **c)** com secção de convecção e de radiação [5].

Por norma a construção deste equipamento consiste numa câmara de aço rectangular ou cilíndrica forrada com material refractário (secção radiante). No entanto, o design do equipamento varia dependendo, principalmente, da taxa de calor a transferir, do tipo de combustível usado e do método de introdução do ar de combustão [6]. À volta da parede do equipamento existem tubos por onde passa o

fluido que será aquecido. A secção radiante é também constituída por uma chama, na parte inferior, que é alimentada por um combustível líquido ou gasoso. A transferência de calor para as paredes dos tubos é então feita por radiação.

Além da secção de radiação existe ainda uma secção de convecção. Nesta secção os gases da combustão transferem calor por convecção para os tubos, sendo depois direccionados para a atmosfera por um tubo situado na parte superior do equipamento.

A figura que se segue mostra uma fornalha vulgarmente utilizada em processos de refinação. O combustível e o ar são fornecidos aos queimadores, sendo o combustível queimado em condições controladas na câmara de combustão.

O calor libertado pela combustão é transmitido através dos tubos da fornalha para o fluido que neles circula. Os produtos de combustão saem da câmara para a atmosfera por intermédio de uma chaminé, devido á diferença de peso em relação ao ar frio do exterior. Por vezes utilizam-se ventiladores para aumentar o fluxo de saída dos gases.

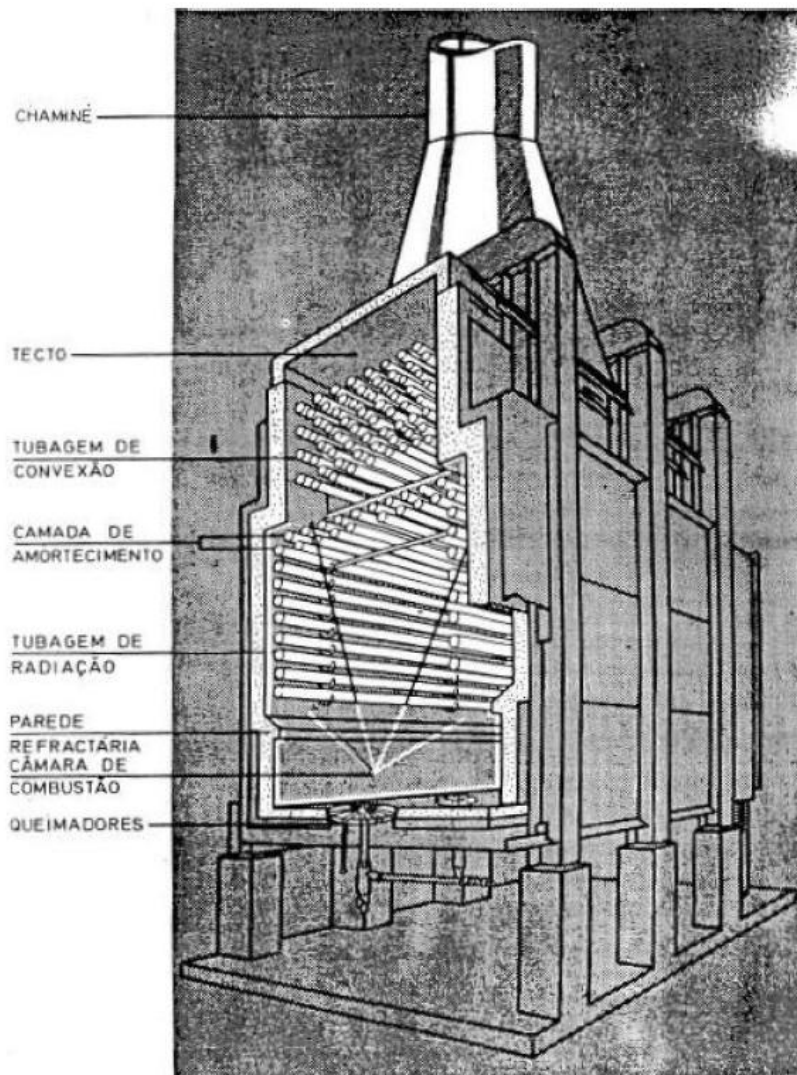


Figura 4: Fornalha típica de uma refinaria

2.4 Princípio de funcionamento de permutadores de calor

Este equipamento é utilizado para efectuar troca de calor entre dois fluidos que se encontram a temperaturas diferentes. É normalmente inserido no processo com a finalidade de arrefecer ou aquecer um determinado fluido. São utilizados em aquecimento de espaços, refrigeração, condicionamento do ar, centrais energéticas, indústria química, indústria petroquímica, refinarias petrolíferas e processamento de gás natural.

São designados de várias maneiras: Caldeiras, condensadores, evaporadores, permutadores carcaça-tubos, regeneradores, de placas, compactos, etc, e têm diversas aplicações: Ar condicionado, refrigeração e criogenia, centrais térmicas, indústria química, indústria automóvel, energia solar, etc.

São classificados segundo diversos critérios: Número de fluidos; arranjo de fluxos (passagens simples – Fluxos paralelos, opostos e cruzados – e múltiplas); processos de transferência (contacto directo ou indirecto); tipos construtivos (tubulares, tubo duplo, carcaça/tubo, placas, regenerativos, compactos); grau de compacidade (compactos e não-compactos).

2.4.1. Permutadores de Carcaça e Tubos

O tipo de permutador de calor mais comum nos processos de refinação é o permutador de carcaça e tubos, destacando as seguintes vantagens:

- A configuração oferece uma grande área de superfície
- Bom traçado mecânico: uma boa forma para funcionamento sob pressão
- Usa técnicas de fabrico bem estabelecidas
- Pode ser construído numa larga escala de materiais
- Limpeza fácil
- Práticas de projecto bem estabelecidas

Um permutador de carcaça e tubos consiste essencialmente num feixe de tubos encerrados num invólucro (carcaça) cilíndrico. As extremidades dos tubos são ajustadas dentro de placas (de tubos), que separam o fluido do lado do invólucro do fluido e do lado do tubo. Montam-se chicanas no invólucro para dirigir o fluxo do fluido e para apoio dos tubos. O conjunto de chicanas e dos tubos é mantido em posição por varas de suporte e espaçadores.

É o permutador de calor mais utilizado em aplicações de alta pressão, que consiste numa série de tubos através dos quais um dos fluidos circula no seu interior. O

segundo fluido circula entre o exterior dos tubos e a carcaça, dando-se a troca de calor entre os fluidos, para ser aquecido ou arrefecido o fluido pretendido.

A Figura seguinte mostra um exemplo deste tipo de permutadores.

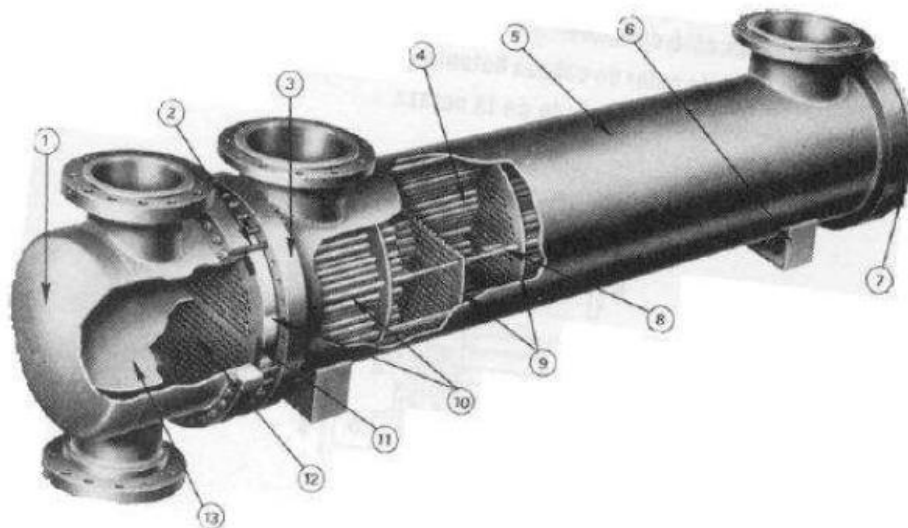


Figura 5 : Esquema de um permutador de carcaça e tubos

Em que:

1.Cabeça	8. Tirantes espaçadores
2.Pernos de fixação	9. Chicanas transversais
3.Flange do corpo	10. Feixe tubular removível
4.Tubos	11. Espelho (e respectiva junta)
5.Corpo	12. Fixação tubos ao espelho
6.Apoio amovível ou fixo	13. Diafragma
7.Cabeça amovível	

Existem vários tipos de permutadores de carcaça e tubos, o tipo mais simples e mais barato é o **permutador de invólucro e tubos** é o traçado com placa de tubos fixa, mas no entanto o feixe de tubos não pode ser removido para limpeza, logo este tipo de permutador não é o mais aconselhado para utilizar no projecto de permutador em causa.

Os **permutadores com cabeça flutuante interna** são mais versáteis que os anteriores, estes são apropriados para diferenças de temperatura elevadas e os tubos podem ser limpos com varetas de uma extremidade à outra.

Existem ainda **permutadores de cabeça flutuante**, mas devido á sua complexidade/custo não é de todo o mais apropriado para o projecto em causa.

O tipo de permutador seleccionado é então o permutador de carcaça e tubos com cabeça flutuante interna.

3 Contextualização

3.1 A Empresa – Galp Energia S.A – Refinaria de Matosinhos

Actualmente a Refinaria do Porto, é constituída pelas seguintes fábricas a que correspondem capacidades de fabrico seguintes:

Tabela 1: Fábricas e respectivas capacidades de Produção da Refinaria de Matosinhos [9].

Fábricas	Capacidade (t/ano)
Combustíveis	3.700.000
Óleos Base	150.000
Aromáticos e Solventes	440.000
Massas Lubrificantes	1.500
Moldagem de Parafinas	10.000
Betumes	150.000
Produção de Enxofre	10.000

Fábrica de Utilidades (FUT)

É indispensável para o funcionamento de todas as unidades processuais da refinaria, um serviço de produção e distribuição de utilidades de energia.

Para responder a esta necessidade, o Complexo dispõe das seguintes facilidades:

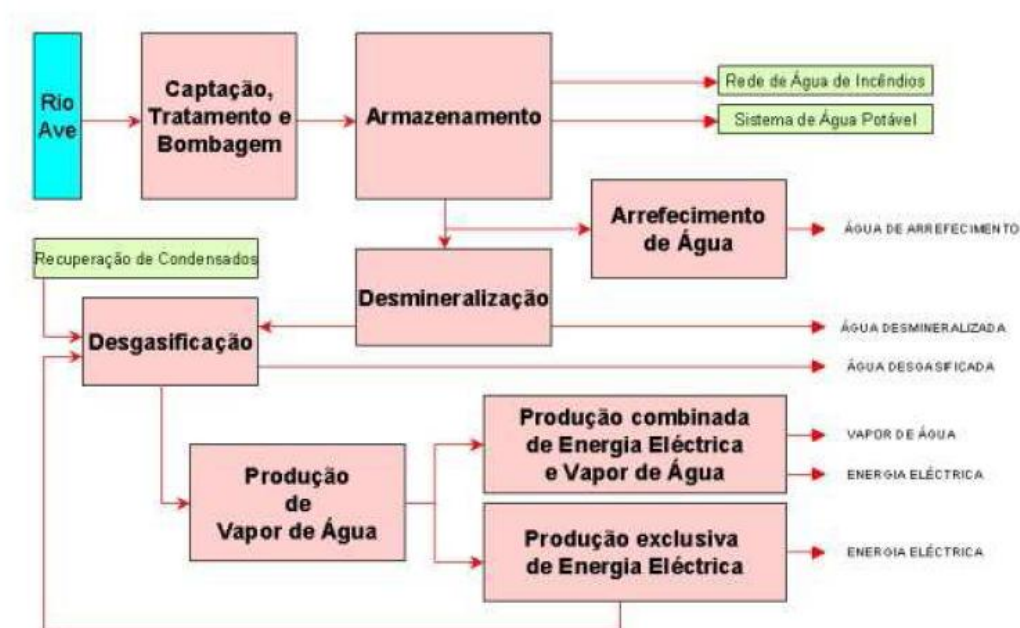


Figura 7: Fábrica de utilidades [9]

Fábrica de combustíveis (FCO)

A Fábrica de Combustíveis é constituída por 14 Unidades Processuais que, utilizando o petróleo bruto, obtêm toda a gama de produtos combustíveis, incluindo grande parte de matéria-prima que alimenta a Fábrica de Aromáticos e Solventes. Dada a flexibilidade e interligação das suas instalações, trata uma grande variedade de petróleos brutos escolhidos, caso a caso, de acordo com as suas características e as necessidades do mercado. No sentido de minimizar os consumos de energia e as perdas inerentes ao processo de fabrico, têm sido implementados novos esquemas operacionais e tecnologias energeticamente mais eficientes.



Os produtos combustíveis são obtidos através de operações de separação física, tratamento químico ou ainda por processos de conversão da estrutura molecular de algumas famílias de hidrocarbonetos.

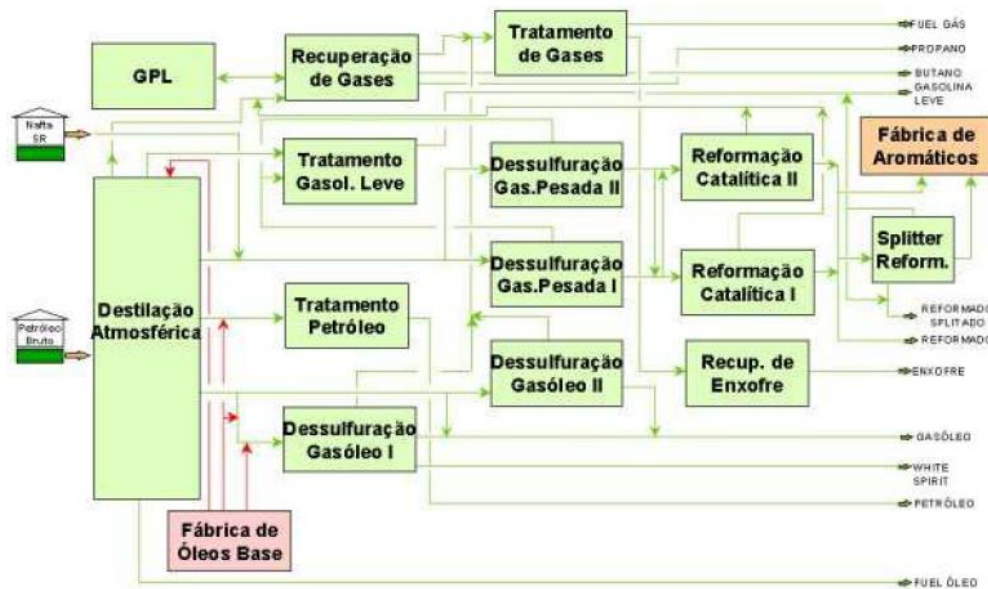


Figura 8 : Fábrica de Combustíveis [9]

Actualmente a sua capacidade de tratamento é de cerca 3,2 milhões t/ano de petróleo bruto.

Fábrica de lubrificantes

A actividade desta Fábrica abrange dois grandes grupos de produtos:

- Óleos Lubrificantes, existindo três linhas de produção autónomas, sendo duas automáticas (uma em contínuo e a outra por partidas) e a terceira manual por partidas;
- Massas Lubrificantes, para cuja produção existe uma linha por partidas.



As massas lubrificantes produzidas usam como agentes espessantes sabões de lítio e de cálcio.

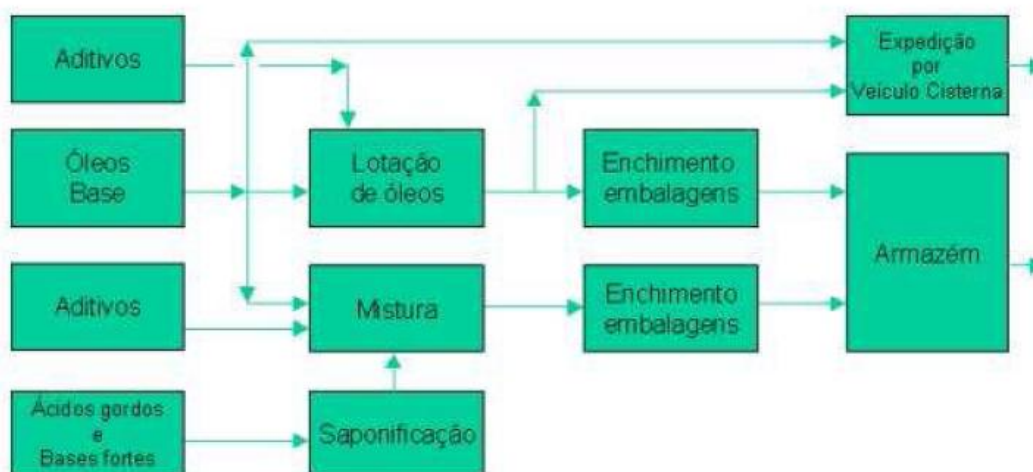


Figura 10: Fábrica de lubrificantes [9]

As capacidades nominais de produção são de 80.000 t/ ano e 2.000 t/ano de óleos e massas lubrificantes respectivamente.

3.2 Fábrica de Óleos Base

Os produtos obtidos na Fábrica de Óleos Base têm diversas aplicações, tais como : óleos para utilização em lubrificantes na indústria automóvel, na aviação, na marinha, em compressores e em turbinas. Estes óleos podem ainda ser utilizados em tintas, nas indústrias de Cortiça e Borracha e também em sistemas hidráulicos e sistemas de aquecimento. Outro produto resultante são as Parafinas tendo as suas aplicações em embalagens, velas, madeira, plásticos, Industria Alimentar e Farmacêutica e também uma vasta aplicação nos cosméticos. Por fim resultam os Betumes Asfálticos em que a sua aplicação se resume a pavimentação e impermeabilização [9].

3.2.1 Unidades Processuais da FOB

As unidades processuais que constituem a instalação utilizam processos físico-químicos que conferem diversas propriedades aos destilados, nos sucessivos tratamentos, para obtenção dos óleos base correspondentes.

As principais unidades processuais da fábrica de óleos base são: (i) **Unidade de Destilação (UN 2000)**; (ii) **Unidade de Desasfaltação pelo Propano (UN 2100)**; (iii) **Unidade de Extração de Aromáticos pelo Furfural (UN 2200)**; (iv) **Unidade de Desparafinação por MEK (UN 2300)**; (v) **Unidade de Tratamento de Óleos pelo Hidrogénio (UN 2400)**; (vi) **Unidade de Hidrogenação de Parafina (UN 2500/2550)**; e (vii) **Unidade de Produção de Betumes (UN 2600)**.

Na UN 2000, o fraccionamento do petróleo bruto *Arabian Light* é feito em diversos destilados em duas colunas. Uma das colunas opera à pressão atmosférica e a segunda sob vácuo. Todos os destilados da coluna atmosférica são enviados para a fábrica de combustíveis, com excepção do resíduo atmosférico que é enviado como carga para a coluna de destilação sob vácuo para ser fraccionado. O gasóleo de vácuo produzido é enviado para a fábrica de combustíveis, juntamente com o gasóleo da secção atmosférica, sendo os restantes enviados para a armazenagem de óleos destilados. Parte do resíduo produzido na secção de vácuo é enviado para a alimentação da unidade de desasfaltação pelo propano, sendo o restante para a unidade de produção de betumes e/ou, em alternativa, para a corrente de fuelóleo de queima da refinaria [3].

A unidade Desasfaltação do Propano trata o resíduo de vácuo proveniente da coluna de destilação sob vácuo, por um processo de extracção líquido/líquido cujo solvente é o propano líquido. Desta extracção que ocorre numa coluna de discos rotativos, resulta um óleo desasfaltado (bright stock) e um resíduo asfáltico. O primeiro é submetido a diversos tratamentos obtendo-se o óleo base correspondente; o segundo, é utilizado na produção de betumes ou incorporado no fuelóleo.

A unidade extracção de Aromáticos pelo Furfural trata os destilados de vácuo e o óleo desasfaltado provenientes da unidade de destilação sob vácuo e da unidade de desfaltação pelo propano, são submetidos a um processo de extracção líquido /líquido para remoção dos seus componentes aromáticos, cujo solvente é o furfural. Esta unidade é relevante no sentido de se obterem óleos refinados com índice de viscosidade desejado. Os extractos que resultam deste processo de tratamento, ricos em hidrocarbonetos aromáticos, podem ser utilizados como fluxante do óleo combustível, como componente na produção de betumes ou, ainda comercializados como solventes.

Na UN 2300 ocorre o tratamento dos refinados provenientes da unidade extracção pelo furfural ou destilados da unidade 2000 por processos de cristalização/filtração, utilizando como solvente uma mistura de metiletilcetona e tolueno. Este tratamento separa da carga os compostos parafínicos de ponto de fusão elevado, cuja presença no óleo base final lhe retira características de fluidez a baixas temperaturas [3].

A unidade UN 2400 permite melhorar a cor dos óleos base, garantindo, por outro lado, uma maior estabilidade aos fenómenos de oxidação. O óleo desparafinado, na presença de um catalisador, reage com hidrogénio num reactor de leito fixo, de forma a obter as especificações definidas [3].

Unidade de Hidrogenação de Parafina permite efectuar o melhoramento e a estabilização da cor e o aumento da pureza das parafinas provenientes da unidade de desparafinação, utilizando hidrogénio com 99,5 % de pureza. A reacção ocorre em reactores de leito fixo, utilizando um catalisador de cobalto/molibdénio e operando em dois estágios de temperatura (dois estágios de reacção). No processo, há remoção de compostos de enxofre e azoto e saturação de aromáticos necessária à obtenção das especificações de qualidade pela FDA (Food and Drugs Administration) [3].

A unidade UN 2600 tem como finalidade a produção de betumes asfálticos pela mistura de três componentes (resíduo asfáltico, resíduo de vácuo e extracto) em proporções adequadas num misturador estático [3].

3.3 A Unidade 2100

A Unidade de Desasfaltação pelo Propano está projectada para tratar o resíduo de Vácuo da Unidade de Destilação I, Un-2000, de molde a conseguir a produção requerida de Bright Stock quando se processa a rama Arabian Light.

3.3.1 Descrição do Processo

A carga de alimentação constituída pelo Resíduo de Vácuo da Unidade 2000 é armazenada no tanque de alimentação TK-2101. Deste tanque o Resíduo de Vácuo é bombeado pela bomba P-2101 e enviado ao permutador Carga do RDC / Mistura Asfalto E-2151 A/B. Antes de entrar neste permutador adiciona-se uma pequena corrente de solvente à carga (pré-diluição). O Resíduo de Vácuo segue para o Arrefecedor de Carga, E-2101. A corrente saída é enviada à coluna de tratamento T-2101 onde entra a cerca de meia altura. É possível fazer “by-pass” ao Arrefecedor com parte da corrente de carga, controlando assim a temperatura de alimentação da coluna RDC.

O solvente é bombeado do acumulador de solvente D-2101 por meio da bomba P-2102 A/B ao qual se junta uma corrente de solvente, do acumulador de solvente de alta pressão D-2102 bombada pela bomba de solvente de alta pressão P-2103.

Uma parte da corrente de solvente entra na linha de óleo de carga como descrito acima. A principal porção de solvente passa ao arrefecedor de solvente E-2102 onde é levado à temperatura desejada posto o que se segue para a Secção inferior do Contactor de Discos Rotativos (Coluna de Tratamento RDC).

Pelo topo da coluna de tratamento RDC sai o óleo Desasfaltado acompanhado pela maior parte do solvente que segue para o sistema de recuperação de solvente da Mistura de Óleo Desasfaltado.

A Mistura de Óleo Desasfaltado passa primeiro pelo evaporador com vapor de baixa pressão E-2103 onde se vaporiza uma parte do solvente seguindo depois para a

coluna de vaporização de óleo desasfaltado (primeiro efeito) T-2102A. Os vapores quentes resultantes da expansão saem pelo topo daquela coluna e são condensados no permutador solvente de alta pressão/mistura óleo desasfaltado, E-2104, havendo vaporização de algum solvente da mistura óleo desasfaltado.

O solvente condensado segue para o acumulador de solvente de alta pressão D-2102 e volta à extracção por meio da P-2103.

A mistura de óleo desasfaltado do E-2104 segue ao segundo efeito da coluna de vaporização de óleo desasfaltado T-2102 B onde o solvente vaporizado se separa da fase líquida, saindo pelo fundo segue então para o revaporizador de vapor de média pressão E-2105 onde se evapora mais solvente. Os vapores de solvente da T-2102 B saem pelo topo e são condensados no condensador de solvente do óleo desasfaltado E-2107 seguindo para o acumulador de solvente D-2101.

A mistura de óleo desasfaltado com vestígios de solvente saindo do E-2105 segue ao rectificador de óleo desasfaltado T-2103, onde por meio de vapor sobreaquecido são retirados do óleo os últimos vestígios de solvente. O óleo desasfaltado do fundo do rectificador é bombeado pela bomba de produtos P-2104 através do permutador óleo desasfaltado/res. Asphaltico E-2152 A/B seguindo depois para o arrefecedor E-2106 e daí para a armazenagem, Secção 6300.

A mistura asfalto segue do fundo do RDC pelos permutadores E-2151 A/B, E-2152 A/B e por controlo da TIC-2109 para o E-2111, onde é sucessivamente pré-aquecida com resíduo de vácuo para a extracção, óleo desasfaltado e com resíduo asfalto, para a fornalha H-2101 donde, parcialmente vaporizada, segue para a coluna de vaporização T-2104. Os vapores de solvente que saem pelo topo da T-2104 são condensados no condensador E-2109 e deste para o acumulador de solvente D-2101.

A mistura asfalto que sai pelo fundo da coluna de vaporização segue para o rectificador T-2105 onde lhe é retirado o solvente residual com vapor sobreaquecido. O resíduo asfalto rectificado é bombeado do fundo do rectificador T-2105 com a bomba P-2105 seguindo em parte para a unidade 2600.

O restante resíduo asfalto segue via E-2111, para os geradores de vapor de baixa pressão E-2153 A/B (se a temperatura e caudal à saída do permutador anterior ainda justificar a permuta), sendo depois fluxado com extracto e/ou parafina. Antes de entrar no gerador de vapor ser-lhe-á adicionada uma pequena corrente de extracto para o fluxar. O resíduo asfalto fluxado é arrefecido no E-2110 até 93°C antes de seguir para a Secção 6100. Quando é necessário produzir combustível de refinaria o gerador de vapor E-2153 é "by-passado" e o resíduo asfalto pode ser fluxado com extracto e/ou

parafina bruta. A mistura segue para a Secção 4700 a uma temperatura entre 199 e 213°C.

Os vapores de cabeça dos rectificadores são constituídos por vapor de água e propano são condensados no condensador E-2108. O condensado resultante separa-se então dos vapores de solvente no separador de condensado D-2103. O condensado é eliminado pela bomba P-2108 para o D-2003 da Unidade 2000 e os vapores de solvente são aspirados pelo compressor de solvente C-2101 passando primeiramente pelo Separador-Purgador D-2104.

O solvente comprimido é condensado no E-2109 e enviado para o acumulador de solvente D-2101.

A instalação inclui ainda um acumulador de descargas D-2105, não indicado no diagrama processual e que pertence ao sistema de válvulas de segurança do solvente. As válvulas de segurança do RDC e a maior parte das outras válvulas de segurança da Unidade de desasfaltação descarregam para este acumulador. Os vapores seguem então para o facho da refinaria enquanto que o óleo que se separa no acumulador é enviado de novo ao tanque de alimentação.

O acumulador de armazenagem de propano D-2106 e a bomba de transferência de propano P-2106 estão também incluídos na unidade embora não indicados no diagrama processual. Este equipamento fica localizado fora da zona da unidade, na zona verde.

O propano de "make-up" é bombeado da Secção 6100 para o acumulador de armazenagem, e transportado para o acumulador de propano D-2101 por meio de bomba de transferência P-2106 na medida das necessidades.

4. Descrição do Problema

Do fundo da coluna de destilação T2003C sai uma corrente com uma potência calorífica de 2,79 Gcal/h, a qual vai ser aproveitada energeticamente. O valor da potência energética é estabelecido para um intervalo de temperaturas de 354°C e 119°C.

A corrente de fundo da coluna, também designada por corrente de reciclo, vai trocar calor com uma mistura de asfalto + propano, o que faz com que esta mistura entre com uma temperatura mais elevada na fornalha.

A fornalha tem duas finalidades: aquecer a mistura que entra a uma temperatura de 96 °C até aos 288°C e também aquecer o vapor de baixa pressão para posterior entrada numa coluna de rectificação. O vapor entra na fornalha a 126 °C e é aquecido até aos 254°C

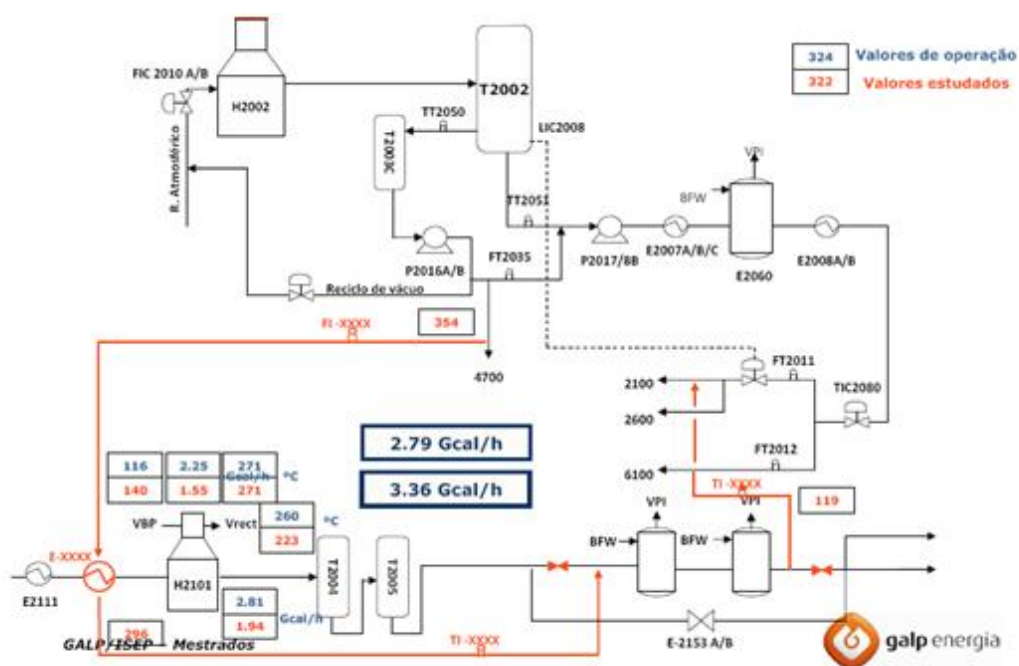


Figura 11 : Esquema do funcionamento da Unidade 2100 com o Aproveitamento da corrente de fundo

5. Resultados calculados

Neste capítulo vão ser efectuados todos os cálculos necessários para o reaproveitamento energético da corrente de reciclo.

No entanto à que salvaguardar o seguinte aspecto que dificultará a sua óbvia utilização: a corrente de reciclo não pode afectar a posterior utilização do vapor de rectificação como tal a sua temperatura de saída não deverá diminuir menos que 20°C.

Tabela 2: Dados da H2101 – serviço asfalto com propano e sobreaquecedor de vapor.

Tubular	Sobreaquecedor	Corrente de reciclo
Qabs. = 3,05×10 ⁶ kcal/h	Qabs. = 101000 kcal/h	Q=2,79 × 10 ⁶ kcal/h
\dot{m} = 25800 kg/h	\dot{m} = 720 kg/h	\dot{m} = 5800kg/h
Te =96°C	Te =126°C	Ti=354°C
Pe = 31,7 kg/cm ²	Pe = 1,38 kg/cm ²	
Ts = 288°C	Ts = 254°C	Ts = 119°C
Ps = 23,6 kg/cm ²	Ps = 1,26 kg/cm ²	

i) Determinar o C_p da corrente asfalto com propano que se encontra no estado líquido (para efeitos de cálculo considerou-se o $C_p \approx$ constante)

$$Q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$$

$$3,05 \times 10^6 = 25800 \times C_p \times (288 - 96)$$

$$C_p = 0,606 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$$

Conversão:

$$1 \text{ kcal} = 4,19 \text{ kJ} = 4186,8 \text{ J}$$

$$C_p = 2,54 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

ii) Determinar o C_p da corrente de reciclo

$$Q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$$

$$2,79 \times 10^6 = 5800 \times C_p \times (354 - 119)$$

$$C_p = 2,20 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} = 9,22 \text{ KJ/kg}^\circ\text{C}$$

iii) Determinar o calor total (Q_T) absorvido na fornalha

$$Q_T = Q_L + Q_v$$

$$Q_T = 3,05 \times 10^6 + 101000 = 3,15 \times 10^6 \text{ kcal/h}$$

iv) Determinar as frações de vapor (X_v) e de líquido (X_L)

$$X_v = \frac{Q_{abs. sobr.}}{Q_T} = \frac{101000}{3,15 \times 10^6} = 0,032 = 3,2\%$$

$$X_L = \frac{Q_{abs. tub.}}{Q_T} = \frac{3,05 \times 10^6}{3,15 \times 10^6} = 0,968 = 96,8\%$$

v) Determinar a Temperatura de entrada da mistura na fornalha (T_{ef}) após pré-aquecimento com a corrente de Reciclo

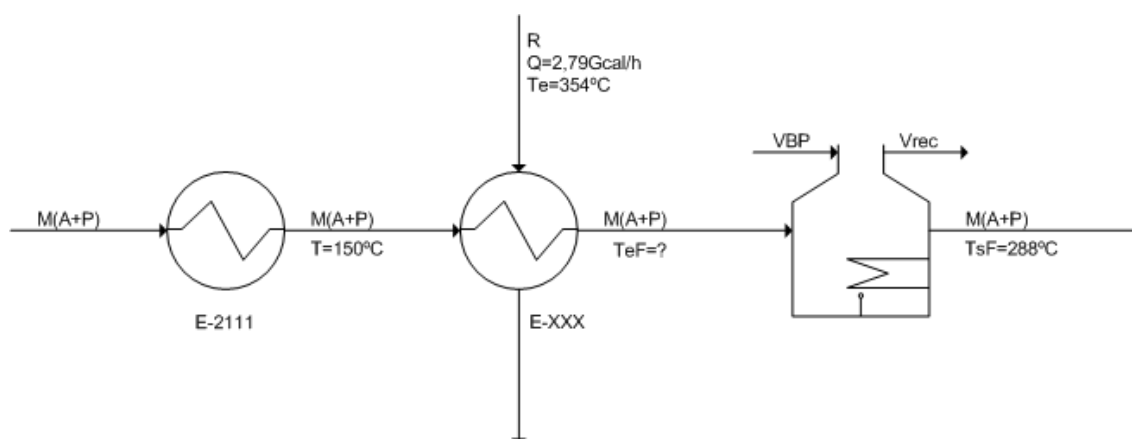


Figura 12: Esquema do permutador de aquecimento da alimentação da corrente da fornalha com a corrente de reciclo.

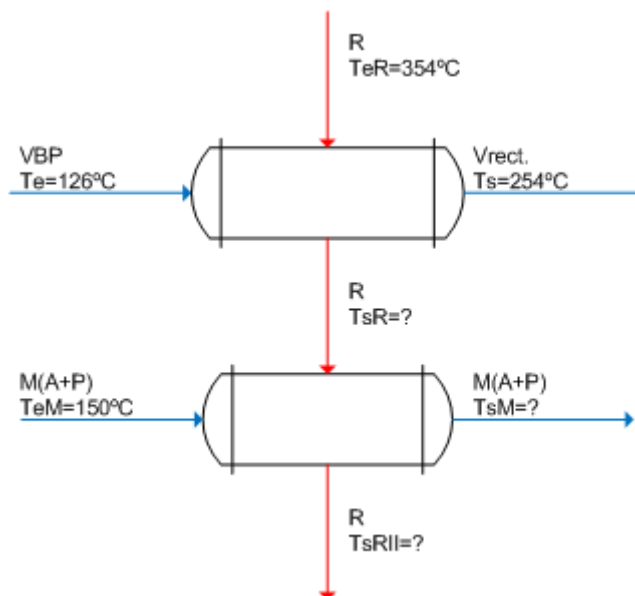
$$Q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$$

$$2,79 \times 10^6 = 25800 \times 0,616 (T_{ef} - 96)$$

$$T_{ef} = 276^\circ\text{C}$$

Do balanço energético resulta uma temperatura de entrada na fornalha de 276 °C, valor este superior ao valor da temperaturas de entrada e bastante próximo do valor de temperatura de saída da fornalha antes da corrente de reciclo ser aproveitada

energeticamente, como tal não há necessidade da existência de uma fornalha para aquecer a mistura de asfalto com propano. Esta pode ser substituída por dois permutadores: um para corrente de reciclo/vapor sobreaquecido e outro para corrente de reciclo/mistura asfalto + propano, tal como é representado na figura que se segue



vi) Determinar o calor posto em jogo no permutador de calor para o vapor sobreaquecido (Q_V)

$$Q_V = Q_f = \dot{m}_f \times \Delta H$$

$$Q_q = 720 \times (2972,9 - 2722,8) = 180072 \text{ kJ/h} = 50 \text{ kJ/s} = 42976,6 \text{ kcal/h}$$

vii) Determinar a temperatura de saída da corrente de reciclo (T_{sr})

$$Q_f = Q_q$$

$$\dot{m}_f \times \Delta H = \dot{m}_q \times C_p \times \Delta T$$

$$50 = 1,6 \times 8,55 \times (354 - T_{sr}) \leftrightarrow T_{sr} = 350 \text{ °C}$$

viii) Determinar o calor posto em jogo no permutador de calor para a mistura de asfalto com propano (Q_M)

$$Q_M = Q_R - Q_V$$

$$Q_M = 2,79 \times 10^6 - 42976,6 = 2,74 \times 10^6 \text{ kcal/h} = 1,15 \times 10^7 \text{ kJ/h}$$

$$Q_M = \dot{m}_M \times C_p \times \Delta T$$

ix) Com o valor do calor trocado na mistura, determinou-se a temperatura de saída da mistura

$$1,15 \times 10^7 = 25800 \times 2,58 \times (T_{sM} - 96)$$

$$T_{sM} = 269 \text{ } ^\circ\text{C}$$

x) Determinar a temperatura de saída da corrente de reciclo do permutador (T_{sRII})

$$1,15 \times 10^7 = 5800 \times 8,55 \times (350 - T_{sRII})$$

$$T_{sRII} = 118 \text{ } ^\circ\text{C}$$

5.1.1 Permutador de calor vapor/ corrente de reciclo

Tabela 3: Propriedades físicas e químicas da corrente de reciclo e do vapor sobreaquecido.

Corrente Reciclo (fluido quente)	Vapor sobreaquecido (fluido frio)
$C_p = 2,58 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$	$C_p = 1,92 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
$\mu = 0,0036 \text{ Ns/m}^2$	$\mu = 3,4 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$
$\dot{m} = 1,61 \text{ kg/s}$	$\dot{m} = 0,2 \text{ kg/s}$
$K = 0,08 \text{ W/m.K}$	$K = 0,032 \text{ W/m.K}$
$T_e = 354^\circ\text{C}$	$T_e = 126^\circ\text{C}$
$T_s = 342^\circ\text{C}$	$T_s = 254^\circ\text{C}$
$\rho = 725 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 0,47 \text{ kg/m}^3$

No interior dos tubos circula o fluido frio

Na carcaça circula o fluido quente

Todas as equações que se seguem fazem parte do projecto de um permutador de calor de carcaça e tubos e foram retiradas de [5]

$$Q = UA\Delta TmF \quad (1)$$

Estimativa inicial $U = 6 \text{ W/m}^2\text{C}$

Cálculo do ΔTm

$$\Delta Tm = \frac{(T_{qe} - T_{fs}) - (T_{qs} - T_{fe})}{\ln\left(\frac{T_{qe} - T_{fs}}{T_{qs} - T_{fe}}\right)} \quad (2)$$

$$\Delta Tm = \frac{(354 - 254) - (342 - 126)}{\ln\left(\frac{354 - 254}{342 - 126}\right)} = 150,6^\circ\text{C}$$

Cálculo do factor de correcção da temperatura, F

O factor de correcção de temperatura depende das temperaturas dos fluidos, do tipo de permutador e é função de dois parâmetros adimensionais: R e P

$$R = \frac{T_{qe} - T_{qs}}{T_{fs} - T_{fe}} \quad (3)$$

$$R = \frac{(354 - 342)}{(254 - 126)} = 0,09375$$

$$P = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{qe} - T_{fe}} \quad (4)$$

$$P = \frac{(254 - 126)}{(354 - 126)} = 0,561$$

Considerando um permutador com duas passagens:

$$F = \frac{\sqrt{R^2+1} \ln[(1-P)/(1-PR)]}{(R-1) \ln \left[\frac{2-P(R+1)-\sqrt{R^2+1}}{2-P(R+1)+\sqrt{R^2+1}} \right]} \quad (5)$$

$$F = \frac{\sqrt{0,09375^2+1} \ln[(1-0,561)/(1-0,561 \times 0,09375)]}{(R-1) \ln \left[\frac{2-0,561(0,09375+1)-\sqrt{0,09375^2+1}}{2-0,561(0,09375+1)+\sqrt{0,09375^2+1}} \right]} = 0,99 \approx 1$$

Cálculo da área total de transferência de calor, A

$$A = \frac{50000}{6 \times 150,6 \times 0,99} = 56 \text{ m}^2$$

Decidir quanto ao traçado do permutador:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Passo quadrado} \\ \text{N}^\circ \text{ de passagens: } 2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{pt} = 1,25 \text{ do} \\ \text{k1} = 0,156 \\ \text{n1} = 2,291 \end{array}$$

Característica dos tubos:

$$d_o = 0,038 \text{ m}$$

$$L = 3,66 \text{ m}$$

$$e = 0,002 \text{ m}$$

Cálculo do número de tubos que constituem o permutador, N_t

$$N_t = \frac{56}{\pi \times 0,038 \times 3,66} = 129 \text{ tubos} \quad (6)$$

O diâmetro do feixe tubular D_b , depende de vários parâmetros e pode ser calculado por:

$$D_b = d_0 \left(\frac{N}{k_1} \right)^{1/n_1} \quad (7)$$

$$D_b = 0,038 \left(\frac{126}{0,156} \right)^{1/2,291} = 0,705 \text{ (Fig. A. 1)} \leftrightarrow D_s - D_b = 65 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Do valor da folga entre o invólucro e o feixe é retirado o valor do diâmetro do feixe:

$$D_s - D_b = 65 \times 10^{-3}$$

$$D_s = 65 \times 10^{-3} + 0,705 = 0,77 \text{ m}$$

Cálculo do coeficiente de transferência de calor e das perdas de carga para o fluido que circula no interior dos tubos

Os dados de transferência de calor podem ser correlacionados utilizando a seguinte expressão:

$$\frac{h_i \times d_i}{k_f} = j_h Re Pr^{0,3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (8)$$

em que:

$$d_i = d_o - 2 \times \text{espessura}$$

$$d_i = 0,038 - 2 \times 0,002 = 0,034 \text{ m}$$

$$Re = \frac{\rho_i \times u_i \times d_i}{\mu_i} \quad (9)$$

$$u_i = \frac{\dot{m}_{fi}}{\rho_f \times A_s} \quad (10)$$

$$\text{em que } \dot{m}_{fi} = \frac{\dot{m}_f}{n^\circ \text{ de tubos por passagem}} \quad (11)$$

$$\dot{m}_{fi} = \frac{0,2}{\frac{129}{2}} = 0,0031 \text{ kg/s}$$

$$A_s = \pi \times r^2 \quad (12)$$

$$A_s = \pi \times \left(\frac{0,038}{2} \right)^2 = 0,0009 \text{ m}^2$$

$$u_i = \frac{0,0031}{0,47 \times 0,0009} = 7,32 \text{ m/s}$$

Deste modo obtém-se o Reynolds

$$Re = \frac{0,47 \times 6,00 \times 0,032}{3,4 \times 10^{-6}} = 26541,2 \text{ (Fig A.2)} \leftrightarrow j_h = 3,8 \times 10^{-3}$$

$$Pr = \frac{c_p \times \mu}{k} \quad (13)$$

$$Pr = \frac{1920 \times 3,4 \times 10^{-6}}{0,032} = 0,204$$

Resultando um coeficiente pelicular interno de:

$$hi = \frac{3,8 \times 10^{-3} \times 32380 \times (0,204)^{0,33} \times 0,032}{0,034} = 68,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Perdas de carga

O fluido que circula no interior dos tubos vai sofrer uma perda de carga devido: ao atrito existente nos tubos; às contracções/expansões que o fluido vai sofrendo nas entradas/ saídas dos tubos; e também devido às mudanças de direcção do escoamento.

Segundo Frank, esta perda de carga, esta perda de carga pode ser estimada pela expressão que se segue:

$$\Delta p_t = Np \left[8J_f \frac{L}{d_i} \times \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{-m} + 2,5 \right] \frac{\rho_f u_i^2}{2} \quad (14)$$

$$Re = 26541,2 \text{ (Fig.A.3)} \leftrightarrow j_i = 4,0 \times 10^{-3}$$

$$\Delta p_t = 2 \left[8 \times 4,0 \times 10^{-3} \times \frac{3,66}{0,034} + 2,5 \right] \times \frac{0,47 \times 6,00^2}{2} = 100,5 \text{ Pa} = 0,0010 \text{ atm}$$

O fluido que circula no interior dos tubos também vai experimentar queda de pressão nas embocaduras de entrada e saída, estas perdas são sem dúvidas as mais drásticas, e traduzem-se pela seguinte equação:

$$\Delta p_{emb} = K \frac{u_{emb}^2}{2} \rho_f \quad (15)$$

em que K toma valor 1 para a entrada e 0,5 para a saída

$$u_{emb} = \frac{\dot{m}_f}{\rho_s \times A_{emb}} \quad (16)$$

$$A_{emb} = \pi \times \frac{d_{emb}^2}{4} \therefore d_{emb} = 7,00 \times 10^{-2} m \quad (17)$$

$$A_{emb} = \pi \times \frac{7,00 \times 10^{-2^2}}{4} = 3,85 \times 10^{-3}$$

$$u_{emb} = \frac{0,2}{0,47 \times 3,85 \times 10^{-3}} = 110,6 \text{ m/s}$$

$$\Delta p_{emb.ent} = 1 \times \frac{110,6^2}{2} \times 0,47 = 2874,6 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{emb.saída} = 0,5 \times \frac{110,6^2}{2} \times 0,47 = 1437,3 \text{ Pa}$$

Perdas totais no interior dos tubos:

$$\Delta p_{total} = \Delta p_t + \Delta p_{emb.ent} + \Delta p_{emb.saída} \quad (18)$$

$$\Delta p_{total} = 100,5 + 2874,6 + 1437,3 = 4412,4 \text{ Pa} = 0,04 \text{ atm}$$

O valor máximo de perdas de carga que vapor sobreaquecido pode sofrer é 0,10 kPa, como tal as perdas de carga sofridas no interior dos tubos são 0,04 atm, este valor é aceitável logo é possível dimensionar um permutador para a produção de vapor de rectificação com troca de calor com a corrente de reciclo.

Método de Bell-Delaware para o cálculos do coeficiente de transferência de calor e das perdas para o fluido que circula na carcaça.

O coeficiente de transferência de calor que circula na carcaça, h_s é calculado pela equação seguinte:

$$h_s = h_{oc} \times F_n \times F_w \times F_b \times F_L \quad (19)$$

Cálculo do coeficiente para o fluxo cruzado ideal, h_{oc}

1. Calcular a área para o fluxo cruzado na fila de tubos na zona central do permutador, A_s

$$A_s = \frac{(pt-do)Dslb}{pt} \quad (20)$$

$$pt = 1,25do$$

$$pt = 1,25 \times 0,038 = 0,0475 \text{ m}$$

$$A_s = \frac{(0,0475 - 0,038) \times 0,77 \times 0,15}{0,0475} = 0,023 m^2$$

2. Calcular a velocidade do fluido no lado do invólucro, u_s

$$u_s = \frac{\dot{m}_s}{\rho_s \times A_s} \quad (21)$$

$$u_s = \frac{1,61}{725 \times 0,023} = 0,096 m/s$$

3. Calcular o número de Reynolds para o fluido na carcaça:

$$Re_s = \frac{725 \times 0,096 \times 0,038}{0,0036} = 734,6 \text{ (Fig.C 4)} \leftrightarrow j_h = 2 \times 10^{-2}$$

4. Calcular h_{oc} pela equação:

$$h_{oc} = \frac{j_h Re Pr_s^{1/3} k_s}{d_o} \quad (22)$$

$$Pr = \frac{2580 \times 0,0036}{0,08} = 116,1$$

$$h_{oc} = \frac{2 \times 10^{-2} \times 734,6 \times 116,1^{1/3} \times 0,08}{0,038} = 150,9 W/m^2 \cdot ^\circ C$$

Cálculo de F_n (factor de correcção da linha de tubos)

$F_n = 1$ pois $100 < Re_s < 2000$ regime de transição

Cálculo de F_b (factor de correcção para a passagem esquiva)

O cálculo de F_b depende das seguintes variáveis: A_b , A_s , N_{cv} , N_s e l_b .

Cálculo da área da folga entre o feixe de tubos e o invólucro

$$A_b = l_b(D_s - D_b) \quad (23)$$

$$A_b = 0,15 \times (65 \times 10^{-3}) = 0,00975 m^2$$

O cálculo do F_b vai também depender do facto de haver ou não faixas de vedação no permutador, considera-se permutador sem faixas de vedação, assim:

Para permutadores sem faixas de vedação, $F_b = f(A_b/A_s)$

$$\frac{A_b}{A_s} = \frac{0,00975}{0,023} = 0,42 \text{ (Fig. C.5)} \leftrightarrow F_b = 0,58$$

Cálculo do F_w (factor de correcção da janela)

No cálculo deste factor intervêm os seguintes paraâmetros: B_b , B_c e R'_a

$$Hb = \frac{Db}{2} - Ds(0,5 - Bc) \quad (24)$$

$$Hb = \frac{0,705}{2} - 0,77(0,5 - 0,25) = 0,16 \text{ m}$$

$$Bb = \frac{Hb}{Db} \quad (25)$$

$$Bb = \frac{0,1075}{0,705} = 0,15 \text{ (Fig. C.6)} \leftrightarrow R'_a = 0,1$$

$$Nw = R'_a \times Nt \quad (26)$$

$$Nw = 0,1 \times 129 = 12,9$$

$$Rw = 2 \times \frac{Nw}{Nt} \quad (27)$$

$$Rw = 2 \times \frac{12,9}{129} = 0,2 \text{ (Fig. C.7)} \leftrightarrow F_w = 1,12$$

Cálculo de F_L (factor de correcção para fugas)

Por fim para o cálculo do F_L são definidos as seguintes variáveis: A_{tb} , A_{sb} e A_L

A área da folga entre os tubos e a chicana, A_{tb} , é calculada por:

$$A_{tb} = \frac{c_t \pi d_0}{2} (Nt - Nw) \quad (28)$$

$$c_t = 0,0006 \text{ m}$$

$$A_{tb} = \frac{0,0006 \times \pi \times 0,038}{2} (129 - 12,9) = 0,0042 \text{ m}^2$$

Por sua vez, a área da folga entre a chicana e a carcaça é, A_{sb} , é definida por:

$$A_{sb} = \frac{C_s D_s}{2} (2\pi - \theta_b) \quad (29)$$

$$C_s = 1,6 \times 10^{-3}$$

$$\theta_b = 1,82 \text{ Fig (C.6)}$$

$$A_{sb} = \frac{1,6 \times 10^{-3} \times 077}{2} \times (2\pi - 1,82) = 0,0027m^2$$

O cálculo da área total para as fugas

$$A_L = A_{tb} + A_{sb} \quad (30)$$

$$A_L = 0,0042 + 0,0027 = 0,0069m^2$$

O factor de correcção FL é calculado pela seguinte equação:

$$F_L = 1 - \beta_L \left[\frac{(A_{tb} + 2A_{sb})}{A_L} \right] \quad (31)$$

$$\frac{A_L}{A_s} = \frac{0,0067}{0,023} = 0,29 \text{ (Fig. C.8)} \leftrightarrow \beta_L = 0,22$$

$$F_L = 1 - 0,22[(0,0042 + 2 \times 0,0027)/0,0069] = 1,09$$

Por fim obtém-se um coeficiente pelicular de transferência de calor:

$$h_s = 150,9 \times 1 \times 0,59 \times 1,12 \times 1,09 = 108,7 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Perdas de carga no lado da carcaça

1.cálculo do número de chicanas:

$$N_b = \frac{L}{l_b} - 1 \quad (32)$$

$$N_b = \frac{3,66}{0,15} - 1 = 23,4$$

Assim, a queda de pressão total do fluido na carcaça é calculada por, $\Delta p_{\text{carcaça}}$:

$$\Delta p_{ca} = 2\Delta p_{extremo} + \Delta(N_b - 1)\Delta p_{cruz} + N_b\Delta p_{janela} + \Delta p_{emb.ent} + \Delta p_{emb.saída} \quad (33)$$

Queda de pressão nas zonas de fluxo cruzado

$$\Delta p_{cruz} = \Delta p_{ideal} F'_b F'_L \quad (34)$$

Em que :

$$\Delta p_{ideal} = 8j_f \frac{\rho_s u_s^2}{2} N_{cv} \left(\frac{\mu_s}{\mu_w} \right)^{-0,14} \quad (35)$$

$$Re = 734,6 \text{ (Figx.A)} \leftrightarrow j_h = 8 \times 10^{-2}$$

$$\Delta p_{ideal} = 8 \times 8 \times 10^{-2} \left(\frac{725 \times 0,096^2}{2} \right) \times 10,3 = 22,02 \text{ Pa}$$

$$N_{cv} = \frac{D_b - 2H_b}{p't} \quad (36)$$

p't=pt para arranjo quadrado

$$N_{cv} = \frac{0,705 - 2 \times 0,1075}{0,0475} = 10,3$$

Cálculo de F'_b (factor de correcção para a passagem esquiva)

$$F'_b = f(A_b/A_s)$$

$$F'_b = f(0,42) \text{ (Fig.C.10)} \leftrightarrow F'_b = 0,2$$

Cálculo de F'_L (factor de correcção para fugas)

$$F'_L = 1 - \beta'_L [(A_{tb} + 2A_{sb})/A_L] \quad (37)$$

$$\beta'_L = f\left(\frac{A_L}{A_s}\right)$$

$$\beta'_L = f(0,29) \text{ (Fig. C. 11)} \leftrightarrow \beta'_L = 0,42$$

$$F'_L = 1 - 0,42[(0,004 + 2 \times 0,0027)/0,0067] = 0,41$$

$$\Delta p_{cruz} = 22,02 \times 0,2 \times 0,41 = 1,8 \text{ Pa}$$

Queda de pressão na zona da janela

$$\Delta p_{janela} = F'_L (2 + 0,6N_{wv}) \rho_s \frac{u_w u_s}{2}$$

$$N_{wv} = \frac{H_b}{p't} \quad (38)$$

$$N_{wv} = \frac{0,1075}{0,0475} = 2,26$$

$$u_w = \frac{\dot{m}_s}{\rho_s \times A_w} \quad (39)$$

$$A_w = \left(\frac{\pi D_s^2 R_a}{4}\right) - \left(N_w \frac{\pi d_0^2}{4}\right) \quad (40)$$

$$A_w = \left(\frac{\pi \times 0,77^2 \times 0,44}{4}\right) - \left(5,04 \times \frac{\pi \times 0,038^2}{4}\right) = 0,013 \text{ m}^2$$

$$\Delta p_{janela} = 0,41 \times (2 \times 0,6 \times 2,26) \times 725 \times \frac{0,17 \times 0,096}{2} = 6,6 \text{ Pa}$$

Queda de pressão num extremo do permutador

$$\Delta p_{extremo} = \Delta p_{ideal} F'_b \left[\frac{N_{cv} + N_{wv}}{N_{cv}}\right] \quad (41)$$

$$\Delta p_{ideal} = 22,02 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{extremo} = 22,02 \times 0,2 \times \left[\frac{10,3 + 2,26}{10,3}\right] = 5,37 \text{ Pa}$$

Queda de pressão nas embocaduras do invólucro

O valor de cargas cinéticas, K, toma valor de K=1,5 para a entrada e K=0,5 para a saída

$$u_{emb} = \frac{\dot{m}_f}{\rho_s \times A_{emb}}$$

$$A_{emb} = \pi \times \frac{d_{emb}^2}{4} \therefore d_{emb} = 7,00 \times 10^{-2} m$$

$$A_{emb} = \pi \times \frac{7,00 \times 10^{-2^2}}{4} = 3,85 \times 10^{-3}$$

$$u_{emb} = \frac{1,61}{725 \times 3,85 \times 10^{-3}} = 0,58 m/s$$

$$\Delta p_{emb.ent} = 1,5 \times \frac{0,58^2}{2} \times 0,47 = 0,118 Pa$$

$$\Delta p_{emb.saída} = 0,5 \times \frac{0,58^2}{2} \times 0,47 = 0,039 Pa$$

Desta forma obtemos perdas na carcaça

$$\Delta p_{carcaça} = 2 \times 5,37 + (23,4 - 1) \times 1,8 + 23,4 \times 6,6 + 0,118 + 0,039 = 205,6 Pa = 0,02 atm$$

5.1.2 Permutador mistura asfalto e propano/ corrente de reciclo (E-XXXL)

As propriedades físicas dos dois fluidos são iguais, só diferem nos caudais e nos valores de temperaturas de entrada/saída dos fluidos e no valor de C_p .

Tabela 4 : Dados da corrente de reciclo e da corrente da mistura asfalto c/ propano

Corrente Reciclo (fluido quente)	Mistura de asfalto com propano (fluido frio)
$C_p = 8,55 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$	$C_p = 2,58 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
$\mu = 0,0036 \text{ Ns/m}^2$	$\mu = 0,0036 \text{ Ns/m}^2$
$\dot{m} = 1,61 \text{ kg/s}$	$\dot{m} = 7,17 \text{ kg/s}$
$K=0,08 \text{ W/m.K}$	$K= 0,08 \text{ W/m.K}$
$T_e = 350^\circ\text{C}$	$T_e = 150^\circ\text{C}$
$T_s = 118^\circ\text{C}$	$T_s = 323^\circ\text{C}$
$\rho = 725 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 725 \text{ kg/m}^3$
$Q=3194 \text{ kJ/s}$	

No interior dos tubos circula o fluido frio

Na carcaça circula o fluido quente

Para fazer uma estimativa correcta do valor de U , calculou-se o valor deste parâmetro (U) no permutador E-2111, dos quais foram fornecidos os dados. (Anexo D)

Estimativa inicial $U = 80 \text{ W/m}^2\text{C}$

Cálculo do ΔT_m

$$\Delta T_m = \frac{(T_{qe} - T_{fs}) - (T_{qs} - T_{fe})}{\ln\left(\frac{T_{qe} - T_{fs}}{T_{qs} - T_{fe}}\right)}$$

$$\Delta T_m = \frac{(350 - 323) - (150 - 118)}{\ln\left(\frac{350 - 323}{150 - 118}\right)} = 29,4^\circ\text{C}$$

Cálculo do factor de correcção da temperatura, F (eq.3)

$$F=0,99$$

Cálculo da área total de transferência de calor, A

$$A = \frac{3,19 \times 10^6}{80 \times 29,4 \times} = 13,5 \text{ m}^2$$

Decidir quanto ao traçado do permutador:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Passo quadrado} \\ \text{N}^\circ \text{ de passagens: } 2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{pt} = 1,25 \text{ do} \\ \text{k1} = 0,156 \\ \text{n1} = 2,291 \end{array}$$

Característica dos tubos:

$$d_o = 0,038 \text{ m}$$

$$L = 3,66 \text{ m}$$

$$e = 0,002 \text{ m}$$

Cálculo do número de tubos que constituem o permutador, N_t

$$N_t = \frac{13,5}{\pi \times 0,038 \times 3,66} = 31 \text{ tubos}$$

O diâmetro do feixe tubular D_b , depende de vários parâmetros e pode ser calculado por:

$$D_b = d_o \left(\frac{N}{k_1} \right)^{1/n_1}$$

$$D_b = 0,038 \left(\frac{31}{0,156} \right)^{1/2,291} = 0,38 \text{ (Fig. C. 1)} \leftrightarrow D_s - D_b = 57 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Do valor da folga entre o invólucro e o feixe é retirado o valor do diâmetro do feixe:

$$D_s - D_b = 57 \times 10^{-3}$$

$$D_s = 57 \times 10^{-3} + 0,38 = 0,437 \text{ m}$$

Cálculo do coeficiente de transferência de calor e das perdas de carga para o fluido que circula no interior dos tubos

Os dados de transferência de calor podem ser correlacionados utilizando a seguinte expressão:

$$\frac{h_i \times d_i}{k_f} = j_h Re Pr^{0,3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

em que:

$$d_i = d_o - 2 \times \text{espessura}$$

$$d_i = 0,038 - 2 \times 0,002 = 0,034 \text{ m}$$

$$Re = \frac{\rho_i \times u_i \times d_i}{\mu_i}$$

$$u_i = \frac{\dot{m}_{fi}}{\rho_f \times A_s}$$

$$\text{em que } \dot{m}_{fi} = \frac{\dot{m}_f}{n^{\circ} \text{ de tubos por passagem}}$$

$$\dot{m}_{fi} = \frac{7,17}{\frac{31}{2}} = 0,46 \text{ kg/s}$$

$$A_s = \pi \times r^2$$

$$A_s = \pi \times \left(\frac{0,034}{2}\right)^2 = 0,0009 \text{ m}^2$$

$$u_i = \frac{0,46}{725 \times 0,0009} = 0,70 \text{ m/s}$$

Deste modo obtém-se o Reynolds

$$Re = \frac{725 \times 0,70 \times 0,032}{0,0036} = 4511,1 \text{ (Fig C.2)} \leftrightarrow j_h = 4,0 \times 10^{-3}$$

$$Pr = \frac{C_p \times \mu}{k}$$

$$Pr = \frac{2580 \times 0,0036}{0,08} = 116,1$$

Resultando um coeficiente pelicular interno de:

$$h_i = \frac{4,0 \times 10^{-3} \times 4511,1 \times (116,1)^{0,33} \times 0,032}{0,08} = 34,6 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Perdas de carga

O fluido que circula no interior dos tubos vai sofrer uma perda de carga devido :ao atrito existente nos tubos; às contracções/expansões que o fluido vai sofrendo nas entradas/ saídas dos tubos; e também devido às mudanças de direcção do escoamento.

Segundo Frank, esta perda de carga, esta perda de carga pode ser estimada pela expressão que se segue:

$$\Delta p_t = Np \left[8J_f \frac{L}{d_i} \times \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{-m} + 2,5 \right] \frac{\rho_f u_i^2}{2}$$

$$Re = 3673 \text{ (Fig.C.3)} \leftrightarrow j_f = 6,5 \times 10^{-3}$$

$$\Delta p_t = 2 \left[8 \times 6,5 \times 10^{-3} \times \frac{3,66}{0,034} + 2,5 \right] \times \frac{725 \times 0,47^2}{2} = 1401,3 \text{ Pa}$$

O fluido que circula no interior dos tubos também vai experimentar queda de pressão nas embocaduras de entrada e saída, e traduzem-se pela seguinte equação:

$$\Delta p_{emb} = K \frac{u_{emb}^2}{2} \rho_f$$

Em que K toma valor 1 para a entrada e 0,5 para o valor de saída

$$u_{emb} = \frac{\dot{m}_f}{\rho_s \times A_{emb}}$$

$$A_{emb} = \pi \times \frac{d_{emb}^2}{4} \therefore d_{emb} = 7,00 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$A_{emb} = \pi \times \frac{7,00 \times 10^{-2^2}}{4} = 3,85 \times 10^{-3}$$

$$u_{emb} = \frac{7,17}{725 \times 3,85 \times 10^{-3}} = 2,58 \text{ m/s}$$

$$\Delta p_{emb.ent} = 1 \times \frac{2,58^2}{2} \times 725 = 2412,95 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{emb.saída} = 0,5 \times \frac{2,58^2}{2} \times 725 = 1206 \text{ Pa}$$

Perdas totais no interior dos tubos:

$$\Delta p_{total} = \Delta p_t + \Delta p_{emb.ent} + \Delta p_{emb.saída}$$

$$\Delta p_{total} = 1401,3 + 2412,95 + 1206 = 5020,25 \text{ Pa} = 5,0 \text{ kPa}$$

Método de Bell-Delaware para o cálculos do coeficiente de transferência de calor e das perdas para o fluido que circula na carcaça.

O coeficiente de transferência de calor que circula na carcaça, h_s é calculado pela equação seguinte:

$$h_s = h_{oc} \times F_n \times F_w \times F_b \times F_L$$

Cálculo do coeficiente para o fluxo cruzado ideal, h_{oc}

1. Calcular a área para o fluxo cruzado na fila de tubos na zona central do permutador, A_s

$$A_s = \frac{(pt - do)Dslb}{pt}$$

$$pt = 1,25do$$

$$pt = 1,25 \times 0,038 = 0,0475 \text{ m}$$

$$A_s = \frac{(0,0475 - 0,038) \times 0,77 \times 0,15}{0,0475} = 0,023 \text{ m}^2$$

2. Calcular a velocidade do fluido no lado do invólucro, u_s

$$u_s = \frac{\dot{m}_s}{\rho_s \times A_s}$$

$$u_s = \frac{1,61}{725 \times 0,023} = 0,096 \text{ m/s}$$

3. Calcular o número de Reynolds para o fluido na carcaça:

$$Re_s = \frac{725 \times 0,096 \times 0,038}{0,0036} = 734,6 \text{ (Fig.C 4)} \leftrightarrow j_h = 2 \times 10^{-2}$$

4. Calcular h_{oc} pela equação:

$$h_{oc} = \frac{j_h Re Pr_s^{1/3} k_s}{do}$$

$$Pr = \frac{8550 \times 0,0036}{0,08} = 384,75$$

$$h_{oc} = \frac{2 \times 10^{-2} \times 734,6 \times 384,75^{1/3} \times 0,08}{0,038} = 225 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Cálculo de F_n (factor de correcção da linha de tubos)

$F_n=1$ pois $100 < Re_s < 2000$ regime de transição

Cálculo de F_b (factor de correcção para a passagem esquiva)

O cálculo de F_b depende das seguintes variáveis: A_b , A_s , N_{cv} , N_s e l_b .

Cálculo da área da folga entre o feixe de tubos e o invólucro

$$A_b = l_b(D_s - D_b)$$

$$A_b = 0,15 \times (57 \times 10^{-3}) = 0,00855 \text{ m}^2$$

O cálculo do F_b vai também depender do facto de haver ou não faixas de vedação no permutador, considera-se permutador sem faixas de vedação, assim:

Para permutadores sem faixas de vedação, $F_b = f(A_b/A_s)$

$$\frac{A_b}{A_s} = \frac{0,00855}{0,023} = 0,37 \text{ (Fig. C. 5)} \leftrightarrow F_b = 0,61$$

Cálculo do F_w (factor de correcção da janela)

No cálculo deste factor intervêm os seguintes parâmetros: B_b , B_c e R'_a

$$Hb = \frac{D_b}{2} - D_s(0,5 - B_c)$$

$$Hb = \frac{0,38}{2} - 0,437(0,5 - 0,25) = 0,066 \text{ m}$$

$$Bb = \frac{Hb}{D_b}$$

$$Bb = \frac{0,066}{0,38} = 0,17 \text{ (Fig. C. 6)} \leftrightarrow R'_a = 0,12$$

$$Nw = R'_a \times Nt$$

$$Nw = 0,12 \times 31 = 3,72$$

$$Rw = 2 \times \frac{Nw}{Nt}$$

$$Rw = 2 \times \frac{3,72}{31} = 0,24 \text{ (Fig. C. 7)} \leftrightarrow F_w = 1,09$$

Cálculo de F_L (factor de correcção para fugas)

Por fim para o cálculo do F_L são definidos as seguintes variáveis: A_{tb} , A_{sb} e A_L

A área da folga entre os tubos e a chicana, A_{tb} , é calculada por:

$$A_{tb} = \frac{C_t \pi d_0}{2} (Nt - Nw)$$

$$ct = 0,0006 \text{ m}$$

$$A_{tb} = \frac{0,0006 \times \pi \times 0,038}{2} (31 - 3,72) = 0,00098 \text{ m}^2$$

Por sua vez, a área da folga entre a chicana e a carcaça é, A_{sb} , é definida por:

$$A_{sb} = \frac{C_s D_s}{2} (2\pi - \theta_b)$$

$$C_s = 1,6 \times 10^{-3}$$

$$\theta_b = 1,68 \text{ Fig (C.6)}$$

$$A_{sb} = \frac{1,6 \times 10^{-3} \times 0,437}{2} \times (2\pi - 1,68) = 0,0016 \text{ m}^2$$

O cálculo da área total para as fugas

$$A_L = A_{tb} + A_{sb}$$

$$A_L = 0,00098 + 0,0016 = 0,0026 \text{ m}^2$$

O factor de correcção F_L é calculado pela seguinte equação:

$$F_L = 1 - \beta_L \left[\frac{(A_{tb} + 2A_{sb})}{A_L} \right]$$

$$\frac{A_L}{A_s} = \frac{0,0026}{0,023} = 0,11 \text{ (Fig. C.8)} \leftrightarrow \beta_L = 0,15$$

$$F_L = 1 - 0,15 \left[\frac{(0,00098 + 2 \times 0,0016)}{0,0026} \right] = 1,37$$

Por fim obtém-se um coeficiente pelicular de transferência de calor:

$$h_s = 225 \times 1 \times 0,61 \times 1,37 \times 1,09 = 205 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Perdas de carga no lado da carcaça

Cálculo do número de chicanas:

$$N_b = \frac{L}{l_b} - 1$$

$$N_b = \frac{3,66}{0,15} - 1 = 23,4$$

Assim, a queda de pressão total do fluido na carcaça é calculada por, $\Delta p_{carcaça}$:

$$\Delta p_{ca} = 2\Delta p_{extremo} + (N_b - 1)\Delta p_{cruz} + N_b\Delta p_{janela} + \Delta p_{emb.ent} + \Delta p_{emb.saida}$$

Queda de pressão nas zonas de fluxo cruzado

$$\Delta p_{cruz} = \Delta p_{ideal} F'_b F'_L$$

Em que :

$$\Delta p_{ideal} = 8j_f \frac{\rho_s u_s^2}{2} N_{cv} \left(\frac{\mu_s}{\mu_w} \right)^{-0,14}$$

$$Re = 734,6 \text{ (Fig.C.9)} \leftrightarrow j_h = 8 \times 10^{-2}$$

$$N_{cv} = \frac{D_b - 2H_b}{p't}$$

$p't = pt$ para arranjo quadrado

$$N_{cv} = \frac{0,38 - 2 \times 0,066}{0,0475} = 5,22$$

$$\Delta p_{ideal} = 8 \times 8 \times 10^{-2} \left(\frac{725 \times 0,096^2}{2} \right) \times 5,22 = 11,16 \text{ Pa}$$

Cálculo de F'_b (factor de correcção para a passagem esquiva)

$$F'_b = f(A_b/A_s)$$

$$F'_b = f(0,37) \text{ (Fig.C.10)} \leftrightarrow F'_b = 0,22$$

Cálculo de F'_L (factor de correcção para fugas)

$$F'_L = 1 - \beta'_L [(A_{tb} + 2A_{sb})/A_L]$$

$$\beta'_L = f \left(\frac{A_L}{A_s} \right)$$

$$\beta'_L = f(0,11) \text{ (Fig. C. 11)} \leftrightarrow \beta'_L = 0,30$$

$$F'_L = 1 - 0,30[(0,00098 + 2 \times 0,0016)/0,0026] = 1,13$$

$$\Delta p_{cruz} = 11,16 \times 1,13 \times 0,22 = 2,77 \text{ Pa}$$

Queda de pressão na zona da janela

$$\Delta p_{janela} = F'_L(2 + 0,6N_{wv})\rho_s \frac{u_w u_s}{2}$$

$$N_{wv} = \frac{H_b}{p'_t}$$

$$N_{wv} = \frac{0,066}{0,0475} = 1,39$$

$$u_w = \frac{\dot{m}_s}{\rho_s \times A_w}$$

$$A_w = \left(\frac{\pi D_s^2 R_a}{4} \right) - \left(N_w \frac{\pi d_0^2}{4} \right)$$

$$A_w = \left(\frac{\pi \times 0,437^2 \times 0,12}{4} \right) - \left(3,72 \times \frac{\pi \times 0,038^2}{4} \right) = 0,014 \text{ m}^2$$

$$u_w = \frac{1,6}{725 \times 0,014} = 0,16 \text{ m/s}$$

$$\Delta p_{janela} = 1,13 \times (2 \times 0,6 \times 1,39) \times 725 \times \frac{0,16 \times 0,096}{2} = 10,5 \text{ Pa}$$

Queda de pressão num extremo do permutador

$$\Delta p_{extremo} = \Delta p_{ideal} F'_b \left[\frac{N_{cv} + N_{wv}}{N_{cv}} \right]$$

$$\Delta p_{ideal} = 11,16 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{extremo} = 11,16 \times 0,22 \times \left[\frac{5,22 + 1,39}{5,22} \right] = 3,1 \text{ Pa}$$

Queda de pressão nas embocaduras do invólucro

O valor de cargas cinéticas, K, toma valor de K=1,5 para a entrada e K=0,5 para a saída

$$u_{emb} = \frac{\dot{m}_f}{\rho_s \times A_{emb}}$$

$$A_{emb} = \pi \times \frac{d_{emb}^2}{4} \therefore d_{emb} = 7,00 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$A_{emb} = \pi \times \frac{7,00 \times 10^{-2^2}}{4} = 3,85 \times 10^{-3}$$

$$u_{emb} = \frac{1,61}{725 \times 3,85 \times 10^{-3}} = 0,58 \text{ m/s}$$

$$\Delta p_{emb.ent} = 1,5 \times \frac{0,58^2}{2} \times 725 = 182,9 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{emb.saída} = 0,5 \times \frac{0,58^2}{2} \times 725 = 60,97 \text{ Pa}$$

Desta forma obtemos perdas na carcaça

$$\Delta p_{carcaça} = 2 \times 3,1 + (23,4 - 1) \times 2,77 + 23,4 \times 10,5 + 182,9 + 60,97 = 336,7 \text{ Pa}$$

Como as perdas de carga sofridas pelos fluidos nos permutadores se encontram nos valores de Pressão e saída dos fluidos intervenientes é possível substituir a fornalha H2101 por dois permutadores, o esquema que se segue representa a aplicação do projecto ou seja o aproveitamento da corrente de fundo para aquecer o vapor de baixa pressão a vapor de rectificação e o aquecimento da mistura de asfalto com propano de 150°C a 288°C

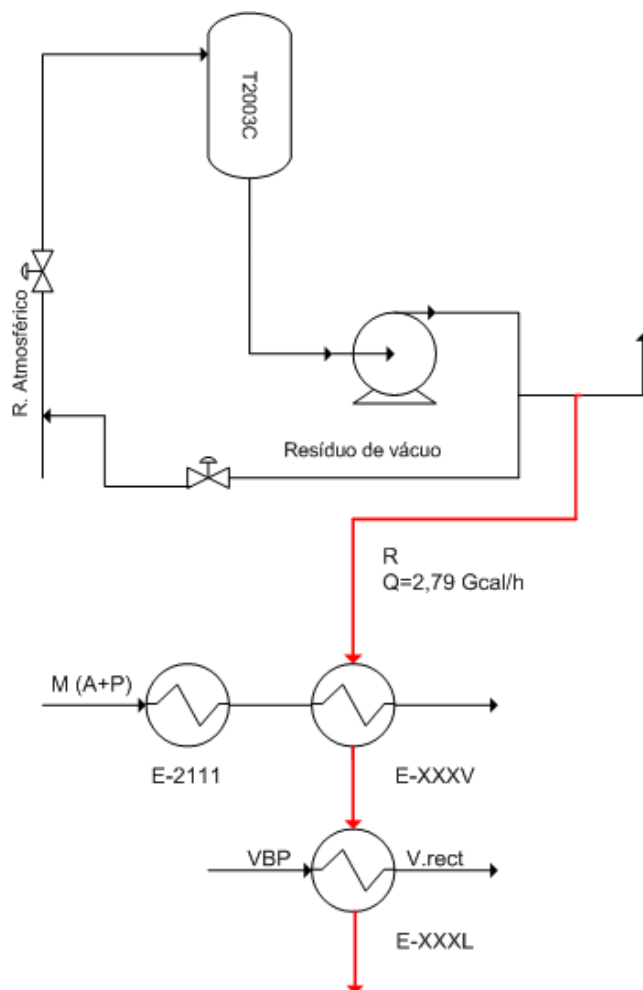


Figura 13: Processo da unidade 2100 com a extinção da fornalha e substituição desta por dois permutadores de carcaça e tubos

6. Análise Económica

Neste capítulo é realizado um estudo económico comparando os gastos de combustível necessário para promover o aquecimento da mistura asfalto + propano e produção de vapor de rectificação na fornalha, com o custo da aquisição de dois permutadores para a sua substituição.

Este estudo é efectuado para um período de 5 anos.

Custos de combustível da fornalha:

Consumo de fuelóleo: 10,9 kg fuel/t carga á fornalha

Considerando o preço de fuelóleo de 2009 = 250,8 €/t

Carga da fornalha (kg/h) = 25800 + 720 = 26520 kg carga á fornalha/hora

Carga à fornalha num dia = 636,5 t/dia

Por dia a fornalha consome :

$$Consumo_{fuel} = 635,6 \times 10,9 = 6937,6 \text{ t de fuel óleo}$$

com um custo diário associado de :

$$Custo = 6937,6 \times 250,8 =$$

Considerando que a fornalha trabalha em continuo em 355 durante o ano

$$Custo \text{ anual} = 355 \times 1722,24 \text{ €} = 611.396,00 \text{ €}$$

Custos de aquisição dos permutadores de carcaça e tubos:

Para a produção de vapor de rectificação, utilizou-se um permutador com uma área de transferência de calor = 56 m², tem um custo igual a 23000 libras [5], ou seja 27.099,3€

Com : índice de custo para 1979 = 239 [5]

índice de custo para Janeiro de 2010 = 572 [5]

$$Custo \text{ actual} = 27.099,3 \text{ €} \times \frac{572}{239} = 64.856,9 \text{ €}$$

Para o aquecimento da mistura asfalto + propano, utilizou-se um permutador com uma área de transferência de calor = 14 m², tem um custo igual a 7000 libras [5], ou seja

8247,62 €, com o mesmo índice de custo do permutador anterior, obtendo-se um custo actual de:

$$\text{Custo actual} = 8247,62\text{€} \times \frac{572}{239} = 19.739,07 \text{€}$$

6.1 Plano de investimento

- Componentes do investimento

Neste item, apenas se contabilizam os custos de imobilizado corpóreo relativos à aquisição de equipamentos e sua instalação, pois a unidade já está dimensionada para esse efeito.

A taxa de amortização anual dos activos para os equipamentos industriais é de 12,5% [decreto de lei nº 25/2009] e será aplicada desde o início da laboração.

- Financiamento do investimento

O financiamento do investimento será 60% em capitais próprios e 40% do investimento em capitais alheios (empréstimo adquirido a uma instituição bancária à taxa anual de 12%, regime de juro composto)

Tabela 5 – Listagem de equipamentos e respectivas quantidades/custos

Equipamentos industriais	Quantidade	Custo unitário (€)	Custo total (€)
Permutador para produção vapor	1	64.856,90	64.856,90
Permutador para aquecimento da mistura	1	19.739,07	19.739,07
Custo total (€)			84.585,97

Tabela 6 – Mapa de pagamento do investimento em capital fixo

Ano	0	0,5	1	2	3	4	5	Total
Equipamento	84.585,97							84.585,97
Custo Instalação (€)	1.750,00							1.750,00
Investimento capital fixo (€)	86.335,97							86.335,97

Tabela 7 – Mapa de amortizações e valor contabilístico do equipamento industrial.

Anos	Equipamento industrial (€)	
	Amortização	Val.contabilístico
	12,5%	
0		84.585,97
1	10.573,25	74.012,72
2	10.573,25	63.439,48
3	10.573,25	52.866,23
4	10.573,25	42.292,99
5	10.573,25	31.719,74

Tabela 8 – Investimento total e montantes respectivos de capitais próprios e alheio

Descrição	
Investimento total (€)	86.235,97
Investimento capital próprio (€)	51.801,59
Investimento capital alheio (€)	34.534,39
Taxa de juro anual	12%

Tabela 9– Plano de reembolso do capital

Ano	C. no início (€)	Juro	Reembolso (€)	Prestação anual (€)	C. no fim do período (€)
1	34.534,39	4.144,13	0	4.144,13	34.534,39
2	34.534,39	4.144,13	0	4.144,13	34.534,39
3	34.534,39	4.144,13	0	4.144,13	34.534,39
4	34.534,39	4.144,13	0	4.144,13	34.534,39
5	34.534,39	4.144,13	34.534,39	38.678,13	0

- Plano de exploração

Para realizar o plano de exploração é necessário definir as necessidades em fundo maneio, sendo estas expressas como a diferença entre o activo circulante de uma empresa e o passivo de curto prazo, ou seja, é a quantia em dinheiro disponível e livre para gerir a empresa.

Para se obter um plano de exploração também é necessário calcular os custos fixos, custos variáveis e respectiva mão de obra.

Neste projecto não foi possível determinar o plano de exploração como tal não foi possível determinar as medidas de rentabilidade do projecto de investimento, ou seja o valor actual líquido (VAL), a taxa interna de rentabilidade (TIR), o período de *Pay Back* e o índice de rentabilidade.

7. Discussão / Conclusão

Este trabalho teve como objectivo aproveitar energeticamente uma corrente de fundo de uma coluna de destilação (T2003C) da fábrica de Óleos Base.

Com a potência térmica desta corrente realizaram-se balanços energéticos e concluiu-se que esta potência térmica é suficiente para aquecer a mistura de asfalto com propano de $T=96^{\circ}\text{C}$ até $T=288^{\circ}\text{C}$, e produzir vapor de rectificação. Sem condicionar as operações seguintes a que estas duas correntes (mistura asfalto com propano e vapor) se destinam.

Sendo esta potência suficiente para fornecer o aquecimento referido, optou-se por substituir a fornalha H-2101 por dois permutadores, tal como mostra a figura 13: um para a troca de calor corrente de reciclo/vapor sobreaquecido e o outro para a troca de calor de corrente de reciclo/mistura asfalto + propano.

Fez-se o dimensionamento dos permutadores obtendo-se para o permutador do vapor uma área de 56 m^2 e um valor de $U=6\text{ W/m}^2\text{C}$, e uma área de $13,5\text{ m}^2$ e valor de $U=80\text{ W/m}^2\text{C}$ para o permutador da mistura líquida.

As perdas de carga sofridas no permutador de vapor são $0,04\text{ atm}$ no interior dos tubos e $0,002\text{ atm}$ na carcaça. Valores estes que se enquadram nos valores de ΔP , logo este permutador pode ser aplicado a estes fluidos.

No que diz respeito ao permutador E-XXXL, os fluidos também podem trocar calor no permutador pois as suas perdas de carga ($5,0\text{ kPa}$ no interior dos tubos e $336,7\text{ Pa}$ para a carcaça).

Finalmente efectuou-se uma análise económica ao consumo e respectivo custo do fuelóleo na fornalha durante o período de um ano sendo o seu valor de $611.396,00\text{ €}$, e comparou-se com o valor da aquisição dos permutadores e respectiva instalação, sendo o valor estimado dos equipamentos de $86.355,97\text{ €}$.

Conclui-se que os permutadores além de aumentarem a eficiência energética da unidade, anularem o consumo de combustível são também mais económicos do que aquecer a mistura de asfalto com propano e produção de vapor na fornalha.

Referências bibliográficas

- [1] Relatório de Sustentabilidade 2008, Galp Energia.
- [3] Coulson & Richardson's, Chemical Engineering Series, Fourth Edition.
- [4] Covas e Regufe, F.Fornalhas, 2008
- [5] Coulson, J.M. e Richardson, J.F., Tecnologia Química, Uma Introdução ao Projecto em Tecnologia Química, Vol, VI, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1989.
- [6] RIAZI.N.R Characterization and Properties of Petroleum Fractions
- [7] W.L.Nelson, Petroleum Refinery Engineering, McGraw-Hill Book Company, Inc, London
- [8] http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/images/stories/ESQPSDCE_17.png acedido em 8 de Outubro de 2010
- [9] Web site da Galp Energia <http://www.galpenergia.com> acedido Setembro de 2010
- [10] Manual de Operação da Unidade 2100 – Desasfaltação do Propano, Petrogal, Edição 1

Anexos

Anexo A: Dados fornecidos pela empresa

Neste anexo, são apresentados os dados fornecidos pela empresa para a resolução do problema em causa

Tabela A.1 – Serviço Mistura Asfalto com Propano e Sobreaquecedor de Vapor

Tubular		8,1
Queda de Pressão Max.	kg/cm ²	3,05
Calor Absorvido	10 ⁶ kcal/h	25800
Caudal	kg/h	
Condições á entrada		
Temperatura	°C	96
Pressão	kg/cm ²	31,7
Vaporização	Peso %	14,0
Densidade		0,7
Viscos. do fluido	Cts	
Mistura		5,0
Betume		5,0×10 ⁶
Propano		0,19
Condições à Saída		
Temperatura	°C	288
Pressão	kg/cm ²	23,6
Vaporização	Peso %	31,0
Densidade		0,865
Viscos. do fluido	Cts	7,0
Temp. Max. da Parede do Tubular	°C	343(5Cr.1/2Mo)
Sobreaquecedor		
Calor absorvido	kcal/h	101000
Caudal	kg/h	720
Queda de Pressão, Cal.	kg/h	0,12
Taxa de transf. Convec.	kcal/h/m ²	17250
Condições à Entrada		

Integração Energética da Unidade 2100 da Fábrica de Óleos Base

Temperatura	°C	126
Pressão	kg/cm ²	1,38
Vaporização	Peso %	98

Condições à Saída

Temperatura	°C	254
Pressão	kg/cm ²	1,26
Vaporização	Peso %	100

Combustão

Pressão do Gás combustível no Queimador	kg/cm ²	1,4
Pressão do Fuel óleo no Queimador	kg/cm ²	7,0
Calor Libertado LHV		
(Fuel Óleo)	kcal/kg	9450/1000
(Fuel Gás)	BTU/SCF	900/1000
Excesso de Ar		20%
Eficiência		81,15%

Anexo B: Lista de Equipamentos.

Neste anexo é apresentada a lista de todos os equipamentos que fazem da parte da UN 2100

Colunas

T-2101	RDC (coluna de extração)
T-2102 A	Coluna de vaporização, 1º efeito (fase óleo)
T-2102 B	Coluna de vaporização, 2º efeito (fase óleo)
T-2103	Rectificador de óleo desasfaltado
T-2104	Coluna de vaporização de propano (fase asfalto)
T-2105	Rectificador de asfalto

Acumuladores

D-2101	Acumulador de propano baixa pressão
D-2102	Acumulador de propano alta pressão
D-2103	Separador de condensado
D-2104	Separador / Purgador
D-2105	Acumulador de descargas para a Flare
D-2106	Acumulador de propano

Tanque

TK-2101	Resíduo de vácuo
---------	------------------

Permutadores

E-2101	Arrefecedor de carga
E-2102	Aquecedor / Arrefecedor de propano
E-2103	Evaporador de propano
E-2104	Permutador produto de topo / produto de fundo da coluna T-2101 A
E-2105	Revaporizador de óleo desasfaltado
E-2107 A/B	Condensador de propano (fase óleo)
E-2108	Condensador do produto de topo dos rectificadores
E-2109	Condensador de propano (fase asfalto)
E-2110	Arrefecedor de asfalto
E-2111	Permutador da mistura asfalto / resíduo asfalto
E-2151 A/B	Permutadores carga do RDC / mistura asfalto
E-2152 A/B	Permutador de óleo desasfaltado (rectificado) / mistura de asfalto
E-2153 A/B	Gerador de vapor

Fornalha

H-2101	Fornalha da mistura asfalto
--------	-----------------------------

Bombas

P-2101 A	Bomba de óleo de carga
P-2101 B	Reserva
P-2102 A	Bomba de propano baixa pressão
P-2102 B	Reserva (da P-2102 A e P-2103)
P-2103	Bomba de propano de alta pressão

Integração Energética da Unidade 2100 da Fábrica de Óleos Base

P-2104 A	Bomba de óleo desasfaltado
P-2104 B	Reserva
P-2105 A	Bomba de asfalto
P-2105 B	Reserva
P-2106 A	Bomba de transferência de propano
P-2106 B	Reserva
P-2107 A	Óleo de selagem da RDC
P-2107 B	Reserva
P-2108	Bomba de condensado
Compressor	
C-2101	Compressor de propano
Diversos	
J-2101	Ejector de evacuação da unidade
S-2101	Separador / Purgador de vapor sobreaquecido
RD-2101	Discos rotativos

Anexo C. Figuras auxiliares para o projecto de permutador de carcaça e tubos

Neste anexo são apresentadas todas as figuras e tabelas necessárias para determinar vários factores aplicados nas equações para a determinação dos parâmetro do permutador de carcaça e tubos.

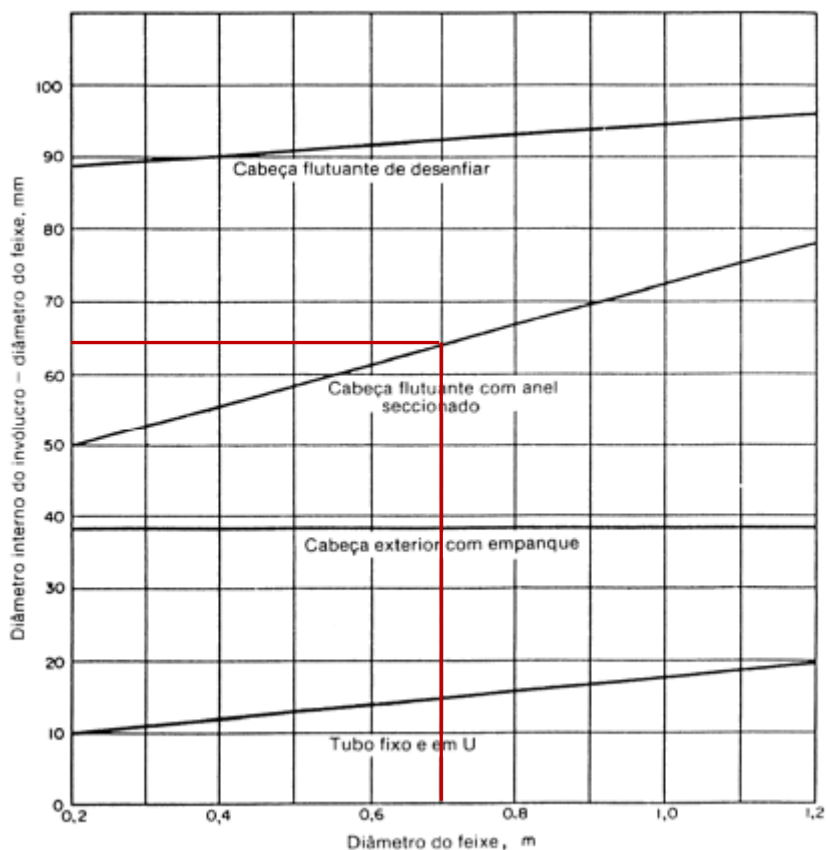


Fig.C.1 – Folga entre o envólucro e o feixe para permutadores de carcaça e tubos [5]

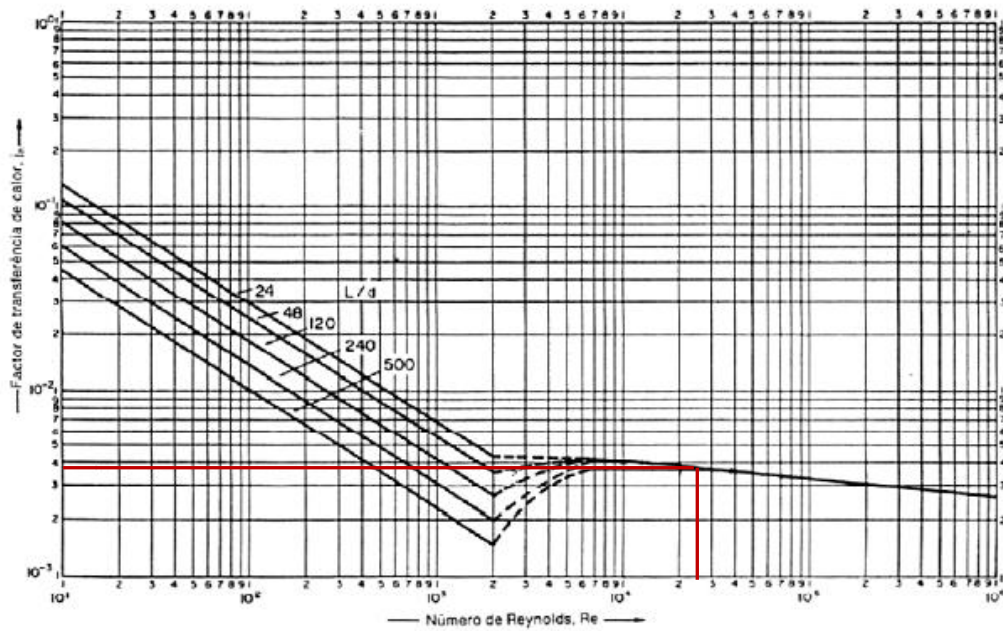


Fig.C.2 – Factor de transferência de calor para o fluido no interior dos tubos [5].

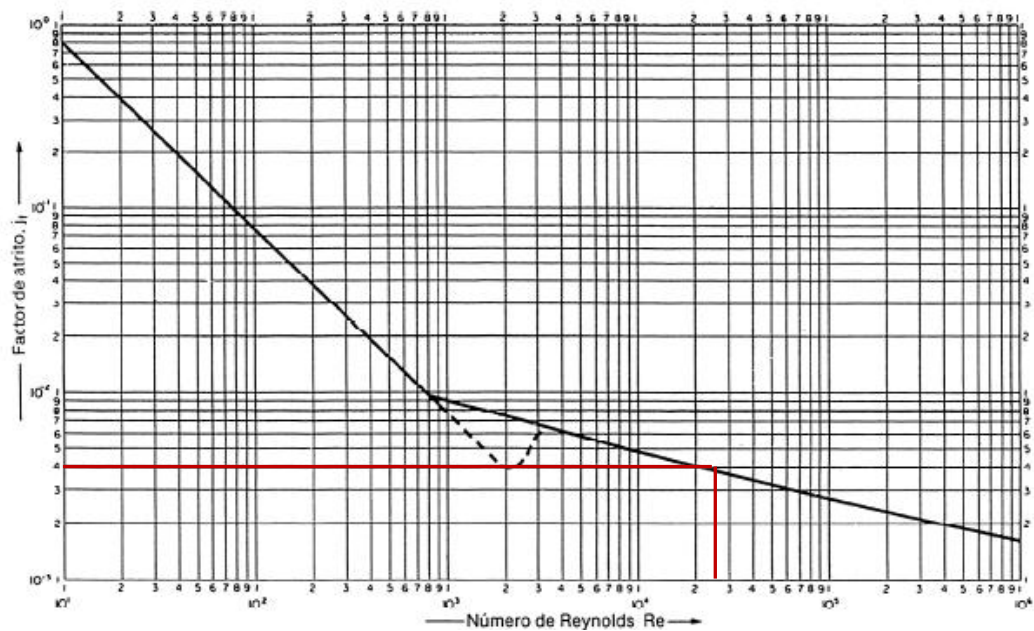


Fig.C.3 – Factor de atrito para o fluido no interior dos tubos [5].

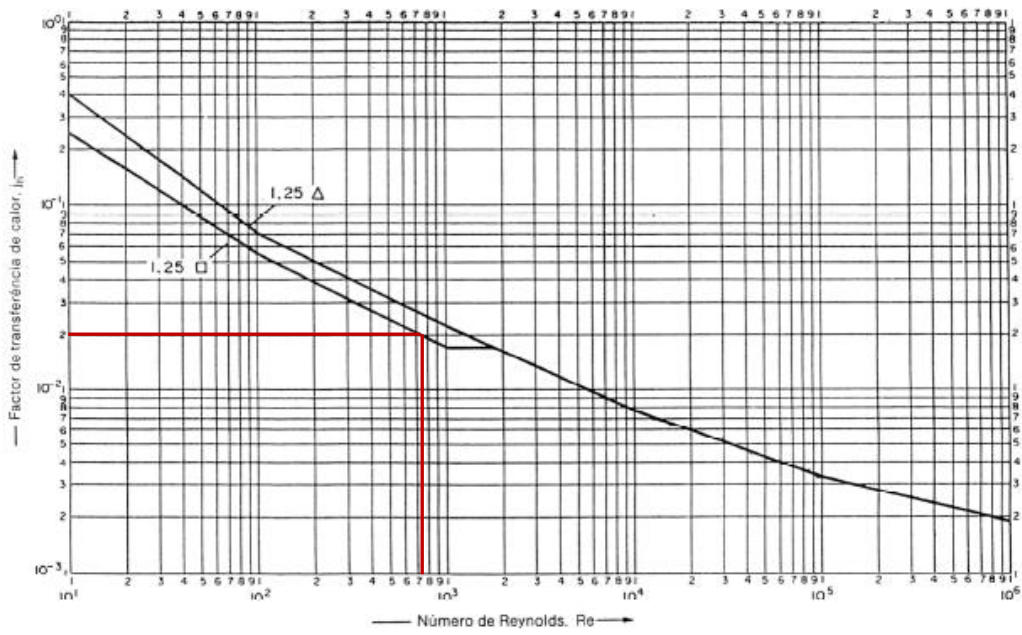


Fig.C.4 – Factor de transferência de calor para o fluido que circula perpendicularmente a um feixe de tubos [5].

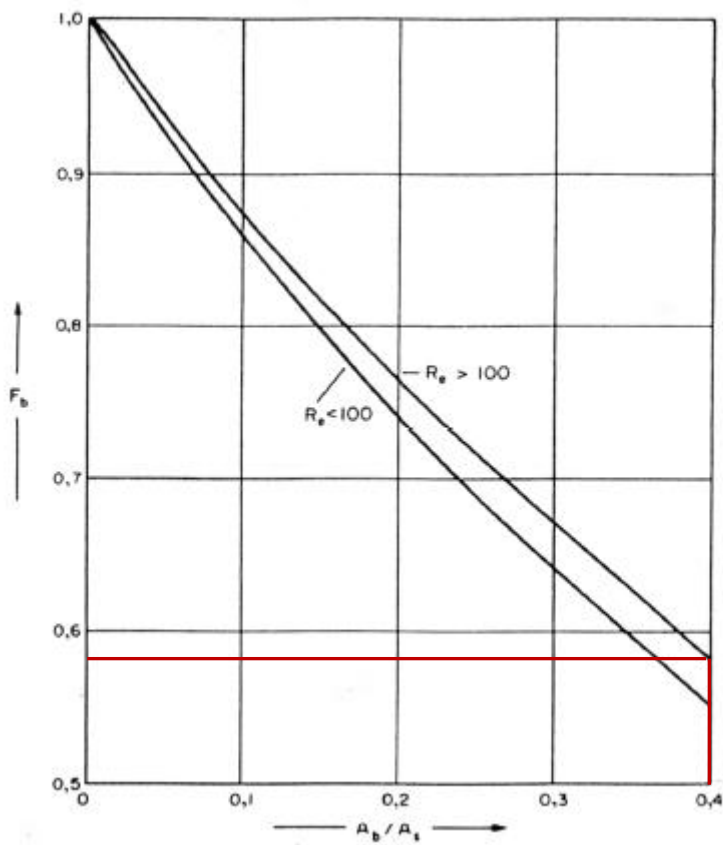


Fig.C.5 – Factor de correcção para a passagem esquiva para a transferência de calor [5].

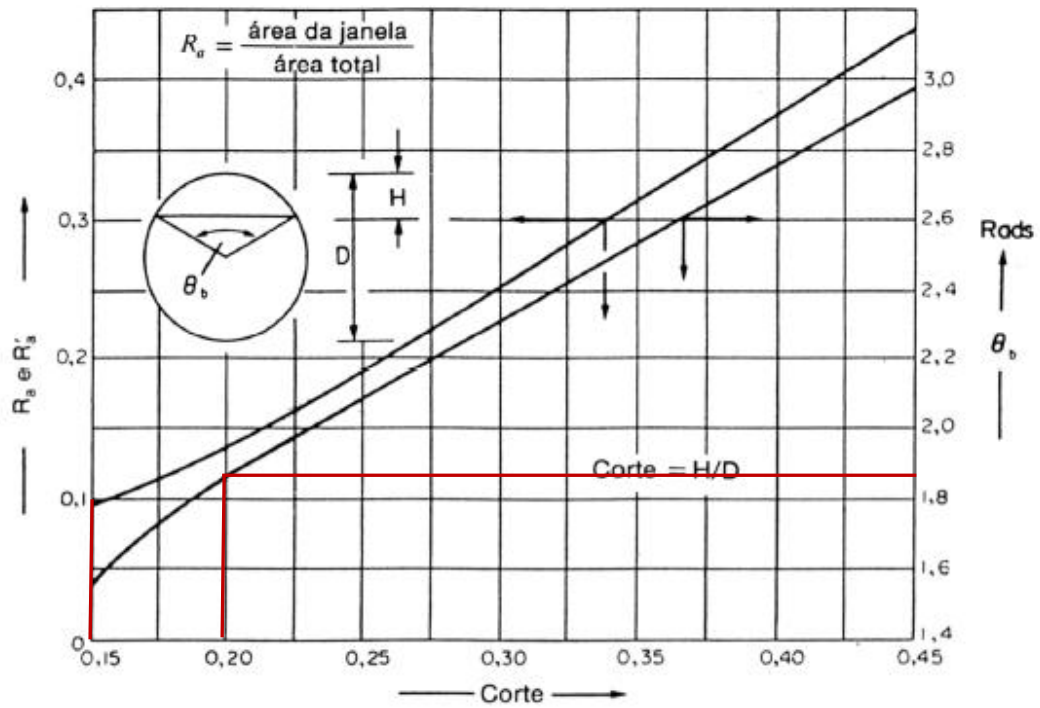


Fig.C.6 – R_a (e R'_a) e θ_b em função do corte [5].

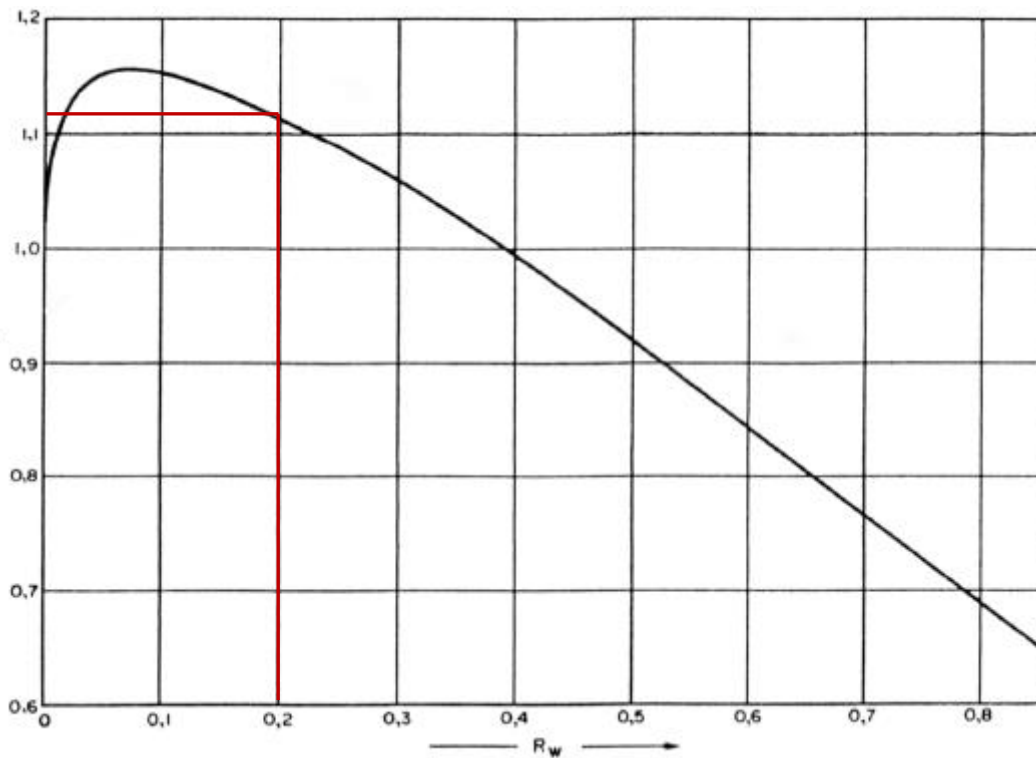


Fig.C.7 – Factor de correcção para a janela para a transferência de calor [5].

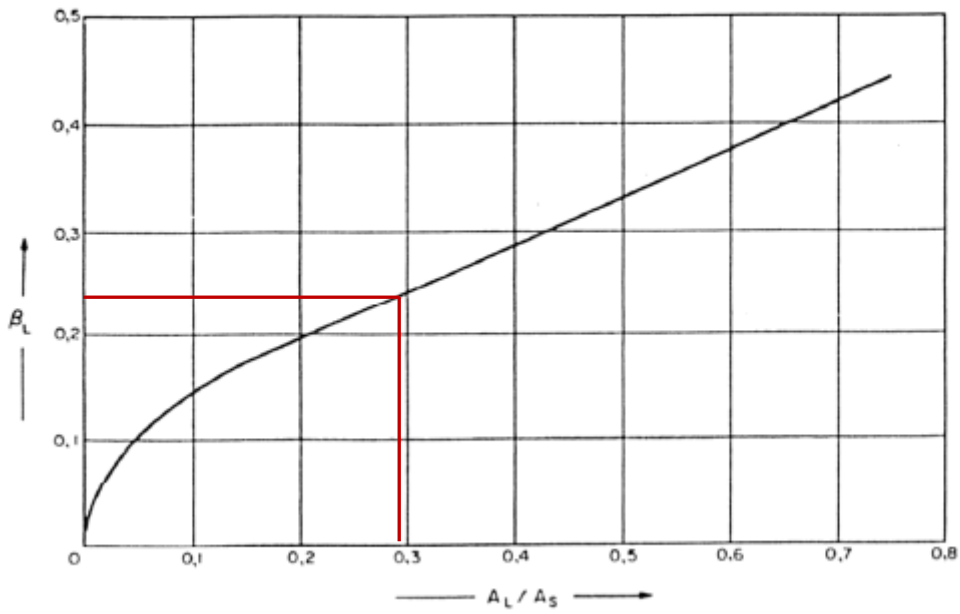


Fig.C.8 – Parâmetro β_L para o cálculo do factor de correcção para as fugas para a transferência de calor [5].

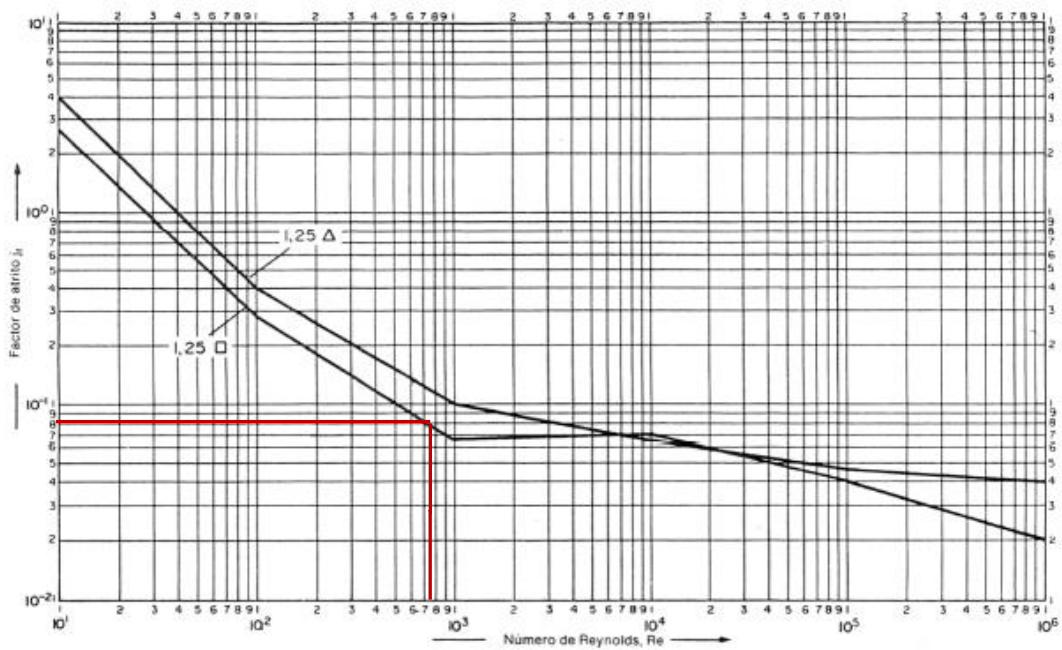


Fig.C.9 – Factor de atrito para um fluido a escoar perpendicularmente a um feixe de tubos [5].

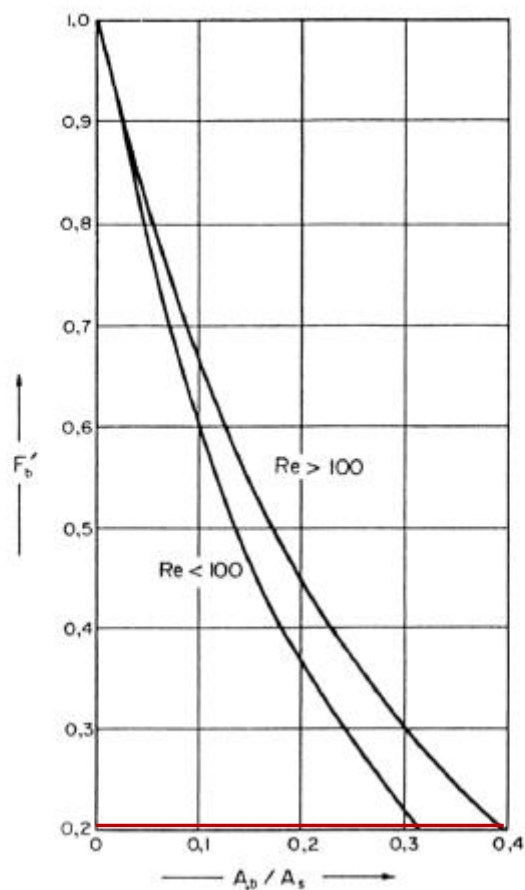


Fig.C.10 – Factor para a passagem esquiva para a queda de pressão [5].

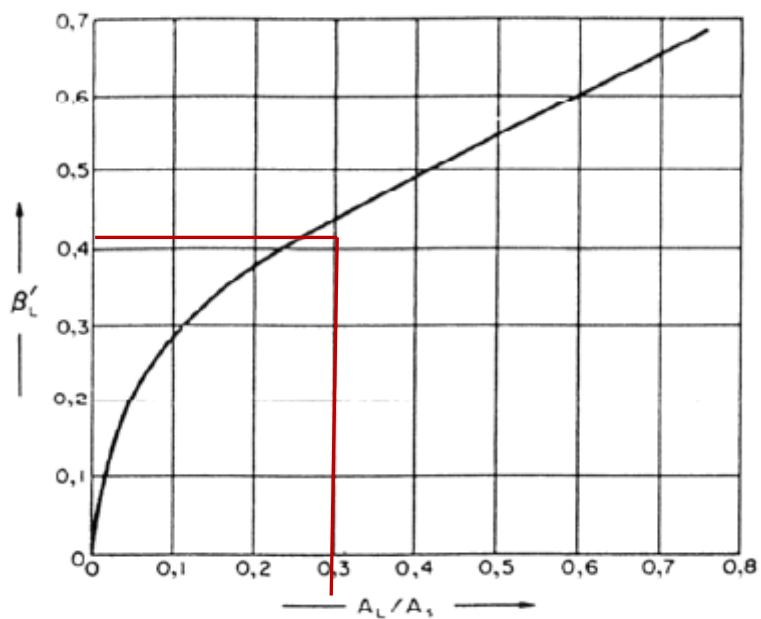


Fig.C.11 – Parâmetro para calcular o factor de correcção para fugas para a queda de pressão [5].

Anexo D. Cálculo do valor de coeficiente global de transferência de calor para o permutador E-2111

$$T_{qe} = 273^{\circ}\text{C}$$

$$T_{qs} = 190,3^{\circ}\text{C}$$

$$T_{fe} = 101^{\circ}\text{C}$$

$$T_{fs} = 150^{\circ}\text{C}$$

$$Q = 821000 \text{ kcal/h} = 955,5 \text{ kJ/s}$$

$$A_{\text{transf. calor}} = 80 \text{ m}^2$$

$$N_t = 222$$

$$N^{\circ} \text{ de passagens na carcaça} = 2$$

$$N^{\circ} \text{ de passagens nos tubos} = 1$$

Deste modo a partir da equação (2),

$$\Delta T_m = \frac{(273 - 150) - (190,3 - 101)}{\ln \left(\frac{273 - 150}{190,3 - 101} \right)} = 105,2^{\circ}\text{C}$$

Com os valores de ΔT_m e F calculados, determinou-se o valor de U, através da equação (1)

$$U = \frac{955,5}{80 \times 150,2 \times 0,99} = 0,079 \text{ kW/m}^2\text{C}$$

