



**IPG** Politécnico  
|da|Guarda  
Polytechnic  
of Guarda

# RELATÓRIO DE ESTÁGIO

Licenciatura em Energia e Ambiente

Pedro Filipe Miragaia Lopes  
Rui Filipe Gonçalves Figueiredo

dezembro | 2015



Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico da Guarda

---

# Desenvolvimento e Construção de um Permutador de Calor “Double Pipe”

Pedro Filipe Miragaia Lopes

Rui Filipe Gonçalves Figueiredo

dezembro de 2015



# Desenvolvimento e Construção de um Permutador de Calor “Double Pipe”

Este trabalho foi desenvolvido  
no âmbito da disciplina de Projeto  
do curso de Licenciatura em  
Energia e Ambiente.

Orientador:

Professor Carlos Alberto Figueiredo Ramos

## Resumo

Hoje em dia as energias renováveis são consideradas um bem muito precioso para a sociedade, pelo que cada vez mais existe a necessidade de se conhecerem os seus benefícios para adaptar os hábitos quotidianos à sua utilização.

Neste sentido, como membros da sociedade e sendo alunos finalistas da licenciatura de Energia e Ambiente, tentámos prestar o nosso melhor contributo ao desenvolver um projeto relacionado com o aproveitamento das energias renováveis - Desenvolvimento e Construção de um Permutador de Calor “Double Pipe”.

Este permutador vai ser aplicado em painéis “Photovoltaic Thermal collector” (PVT) que terão como objetivo utilizar a energia solar para aquecer um fluido e produzir energia elétrica.

## Agradecimentos

Desde o início da nossa caminhada, contámos com o apoio incondicional e a confiança dos que nos rodeiam, nomeadamente dos professores que nos orientaram até ao ponto em que estamos. Por essa razão, desejamos expressar os nossos sinceros agradecimentos.

Ao professor Carlos Alberto Figueiredo Ramos, agradecemos o apoio, a partilha do saber e as valiosas contribuições para a realização do projeto. Acima de tudo, estamos agradecidos pelos preciosos conselhos e encorajamento que sempre nos deu, bem como por nos ter acompanhado nesta jornada e por ter estimulado o nosso interesse pelo conhecimento científico.

Ao responsável pelas oficinas, Carlos Batista, por toda a disponibilidade e ajuda que nos deu na construção do nosso projeto.

Ao corpo docente do curso vai o nosso bem-haja pela disponibilidade demonstrada e pela competência científica.

Às nossas famílias que mostraram paciência e nos deram apoio constante e a quem devemos o que somos...

E por último, e não menos importante, o nosso agradecimento aos colegas de curso que nos demonstraram amizade e solidariedade nos momentos adequados.

## Índice

Resumo.....	I
Agradecimentos.....	II
Índice.....	1
Índice de Figuras .....	3
Capítulo 1 – Introdução.....	4
Introdução .....	5
Em que consiste o projeto .....	5
Para que serve a quem se destina o presente relatório .....	6
Organização do relatório.....	6
Capítulo 2 – Trabalho de pesquisa .....	7
Painéis PVT.....	8
O que são?.....	8
Rendimento Elétrico e Térmico.....	9
Tipos de Coletores Híbridos a Água .....	10
Permutadores de calor .....	11
1) Processo de transferência de calor .....	11
2) Tipo de construção.....	12
3) Tipo de escoamento.....	15
Cuidados a ter na operação de permutadores de calor.....	16
Aplicações dos permutadores de calor .....	17
Capítulo 3 - Desenvolvimento do projeto .....	18
Etapa 1 – Seleção e recolha dos materiais.....	19
Etapa 2 - Construção da carcaça do permutador.....	20
Etapa 3 – Soldadura das ligações exteriores.....	21
Etapa 4 – Construção da parte interior do permutador .....	21
Etapa 5 – Construção das extremidades da carcaça .....	22
Etapa 6 – Construção do suporte .....	23
Etapa 7 – Testes .....	24
Etapa 8 – Construção do isolamento .....	24
Etapa 9 – Fórmulas e cálculos .....	26

Referências finais .....	29
Capítulo 4 - Conclusão.....	31
Conclusão .....	32
Web grafia .....	33

## Índice de Figuras

Figura 1- Coletor PVT .....	8
Figura 2- Esquema de um painel PVT .....	8
Figura 3- Sistema híbrido .....	9
Figura 4- Coletores híbridos a água .....	11
Figura 5- Permutador de calor de construção tubular .....	13
Figura 6- Permutador de calor carcaça e tubo .....	13
Figura 7- Permutador de calor de tubo duplo .....	14
Figura 8- Permutador de calor em serpentina.....	14
Figura 9- Permutador de calor de construção em placas .....	15
Figura 10- Tubos de cobre.....	20
Figura 11- Tubos de cobre já limpos.....	20
Figura 12 - Soldadura com oxiacetileno.....	20
Figura 13- Soldadura com TIG .....	20
Figura 14 - Curvas de cobre .....	21
Figura 15- Curvas de cobre soldadas .....	21
Figura 16- Tubo de cobre .....	21
Figura 17- Alhetas .....	21
Figura 18- Chapa de cobre .....	22
Figura 19- Alhetas já colocadas .....	22
Figura 20- Chapa circular de cobre .....	23
Figura 21- Permutador acabado .....	23
Figura 22- Permutador com o suporte.....	23
Figura 23- Teste com água .....	24
Figura 24- Bomba e bateria.....	24
Figura 25- Tubo de PVC .....	25
Figura 26- Lã de rocha .....	25
Figura 27- Parte interior do isolamento.....	25
Figura 28- Circunferências de roofmate.....	25
Figura 29- Gráficos de leitura de temperaturas .....	29
Figura 30- Esquema do permutador Finalizado .....	30
Figura 31- Permutador Finalizado.....	30

## Capítulo 1 – Introdução

## Introdução

As energias renováveis são consideradas um bem muito precioso para a sociedade, pelo que cada vez mais existe uma necessidade de se conhecerem os seus benefícios e adaptar os hábitos do quotidiano à sua utilização.

Considerando que o preço dos combustíveis fósseis, recursos não renováveis e cada vez mais escassos, tem vindo a aumentar cada vez mais, há uma necessidade de se pensar em aproveitar energia resultante de fontes renováveis por forma a minimizar os custos e a diminuir a forte poluição que se faz sentir em proporções cada vez mais significativas.

Encontrando-nos nós a concluir uma licenciatura em Energia e Ambiente, que congrega a parte ambiental com a energética, surgiu a ideia de desenvolver um projeto cujo objetivo passa por utilizar uma energia renovável. O produto final do nosso projeto, o permutador de calor, embora esteja enquadrado nas energias renováveis, vai ser aplicado num coletor solar que será utilizado num ambiente prático.

### Em que consiste o projeto

O projeto por nós desenvolvido consiste na construção e desenvolvimento de um permutador de calor do tipo “double pipe”. A nossa escolha em relação ao tipo de permutador a desenvolver teve por base uma pesquisa sobre os que já existem no mercado e tivemos como referência qual tem o melhor rendimento. A escolha incidu sobre o permutador do tipo “double pipe”, uma vez que é o que apresenta as características pretendidas. Este permutador, após ser concluído, vai ser colocado em funcionamento juntamente com coletores híbridos (painéis PVT) de modo a aproveitar a energia solar captada que pode vir a ser usada para fins domésticos e/ou industriais.

## Para que serve a quem se destina o presente relatório

O presente relatório, além de servir como:

- Um documento de base de todo o trabalho realizado no âmbito da disciplina de Projeto inserida na licenciatura do curso de Energia e Ambiente;
- Também serve como meio de interação entre os conhecimentos académicos adquiridos ao longo do curso e um caso prático aplicado à vida real;

O mesmo relatório também se destina:

- A todas as pessoas que tenham necessidade ou curiosidade de analisar um trabalho nesta área.

## Organização do relatório

O presente relatório encontra-se organizado em 4 capítulos.

No capítulo 1, “Introdução” descreve-se de uma forma genérica em que consiste o projeto, como está estruturado e a quem se destina.

No capítulo 2, “Trabalho de pesquisa”, é apresentada toda a informação que serviu de desenvolvimento do nosso projeto. É descrita de forma pormenorizada em que consistem e como funcionam os painéis PVT e o funcionamento e aplicações dos permutadores de calor.

No capítulo 3, “Desenvolvimento do projeto”, são descritas todas as fases de construção do projeto. Por fim são apresentados os cálculos para determinar qual a área de transferência de calor do permutador.

No capítulo 4, “Conclusão”, apresenta-se de uma forma sucinta a opinião final sobre o presente projeto.

## Capítulo 2 – Trabalho de pesquisa

## Painéis PVT

### O que são?

O coletor PVT ou coletor híbrido (Figura 1), é a junção entre a componente térmica e fotovoltaica num só painel. É composto por células fotovoltaicas normais e enquanto absorve a energia solar para a transformar em energia elétrica, ao mesmo tempo aquece a água que se localiza na parte de trás do painel.

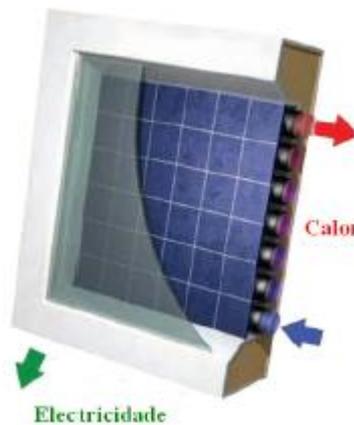


Figura 1- Coletor PVT

Basicamente, consiste na adição de uma placa absorvente a um módulo fotovoltaico. Desta forma, a placa absorvente irá coletar a energia térmica provocando um arrefecimento no módulo fotovoltaico (conforme figura 2), o que resulta numa melhoria no seu comportamento elétrico. Essa energia térmica é aproveitada para aquecer água.

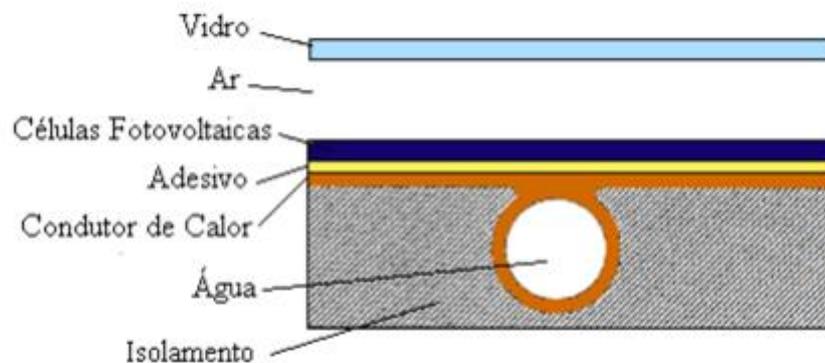


Figura 2- Esquema de um painel PVT

O sistema híbrido (Figura 3) é composto por uma parte térmica e uma elétrica. O sistema elétrico é formado por cabos de ligação, inversor e ligação a rede elétrica. O sistema térmico, para aquecimento de águas sanitárias, é constituído por tubagens, depósito de armazenamento, permutador exterior e grupo de circulação (bomba circuladora, válvulas, regulador de caudal e termómetros de ida e retorno).

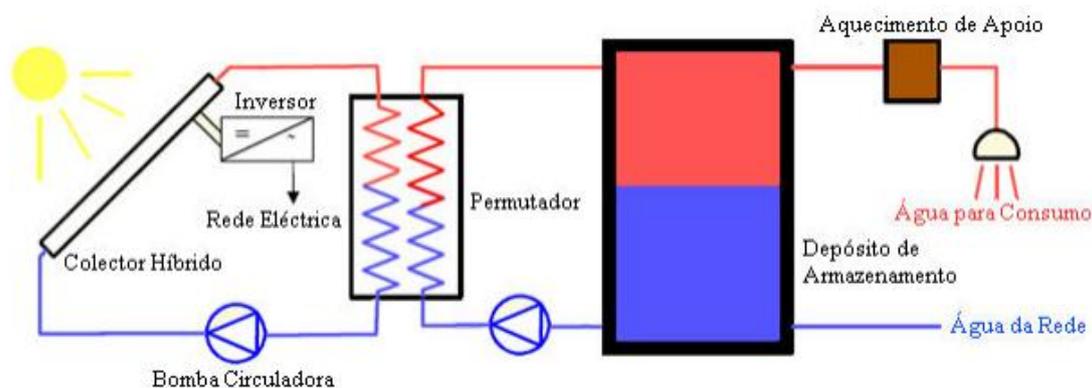


Figura 3- Sistema híbrido

## Rendimento Elétrico e Térmico

Embora, como referido acima, o aproveitamento do calor gerado pelas células fotovoltaicas aumente a eficiência elétrica, na verdade, um coletor híbrido, tem geralmente, um rendimento elétrico mais baixo que um fotovoltaico. Isto deve-se à radiação solar refletida na cobertura do módulo, causando perdas no rendimento na ordem dos 8%.

Esta perda no rendimento é devido a quatro fatores:

- O coeficiente de absorção da superfície fotovoltaica é menor do que um coletor térmico, e existem as várias perdas por reflexão. Enquanto num coletor normal o coeficiente de absorção é superior a 95%, num coletor híbrido situa-se entre 75 – 85%. A célula fotovoltaica só absorve radiação solar se a energia do fóton for superior a energia da banda de condução. Assim, as radiações com comprimento de onda longo, com uma energia de fóton menor que a da banda de condução, serão dificilmente absorvidas. As perdas por reflexão podem ocorrer na

cobertura do módulo (se existir), no vidro de proteção das células e nas próprias células fotovoltaicas;

- A resistência térmica, entre a superfície absorvente e o fluido do coletor (neste casos água), aumenta devido a adição de sucessivas camadas de material (células fotovoltaicas, material de encapsulamento (EVA – silicone), lâmina de proteção das células, vidro e a convencional placa absorvente). O que implica um coeficiente de transferência de calor menor, tendo um efeito depreciativo tanto no rendimento térmico como elétrico;
- A superfície fotovoltaica não é seletiva, resultando em elevadas perdas térmicas por radiação. De facto, o silício possui uma elevada emissividade a comprimentos de onda longos, originando elevadas perdas por radiação. Um coletor híbrido apresenta maiores perdas no topo do módulo;
- A radiação solar que é convertida em eletricidade, não é aproveitada para fins térmicos.

### **Tipos de Coletores Híbridos a Água**

Os coletores híbridos a água (Figura 4) podem ser divididas em quatro grupos :

- Coletor híbrido Placa-Tubo (1);
- Coletor híbrido de Canais (2);
- Coletor híbrido de Corrente Livre (3);
- Coletor híbrido com Duas Superfícies Absorsoras (4).

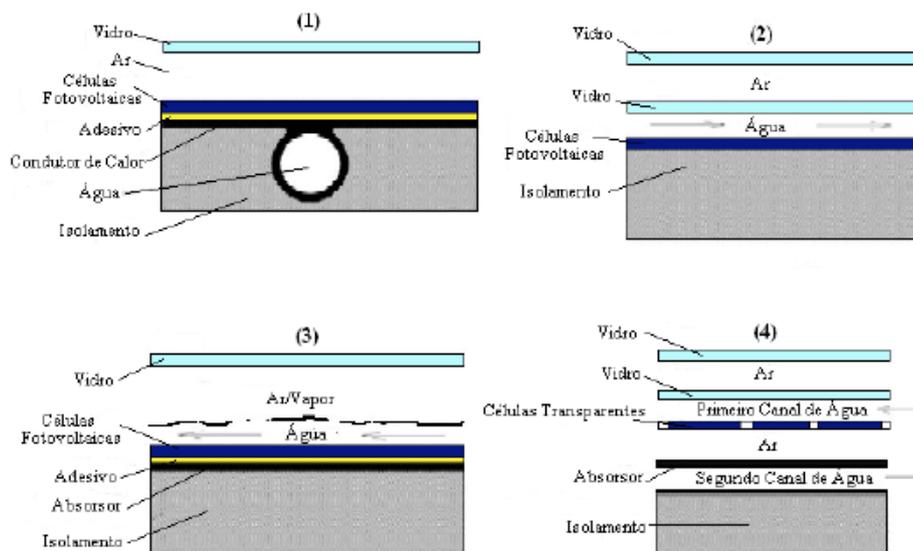


Figura 4- Coletores híbridos a água

O tipo de coletores (2), (3) e (4) não foram ainda comercializados por nenhuma empresa do sector. A principal desvantagem, destes módulos, é possuírem um design diferente do frequente coletor térmico, sendo mais difícil a sua construção. De facto, os módulos (2) e (3) apresentam problemas de construção devido a sua estrutura pesada e frágil. Por sua vez, no coletor (3), a livre circulação de água origina evaporação, responsável por perdas no rendimento térmico e elétrico.

## Permutadores de calor

Permutadores de calor são equipamentos que têm como objetivo promover a transferência de calor entre duas ou mais correntes de fluidos. A classificação dos permutadores de calor pode ser efetuada de diversas formas consoante o critério considerado.

### 1) Processo de transferência de calor

- **Contacto direto**

Neste sistema existe contacto entre os fluidos entre os quais se permuta calor. Em alguns casos trata-se da mesma substância sendo o processo uma mistura. Outro

exemplo são torres de refrigeração nas quais ar e água se separam, existindo no entanto transferência de massa das gotas de água para o ar húmido.

- **Contacto indireto.**

Neste sistema podemos ainda ter a transferência direta ou através de um sistema intermédio de armazenamento/transporte. Na transferência direta os fluídos encontram-se em contacto com uma superfície sólida que os separa. Na transferência de calor com um meio intermédio é usado um fluido ou uma matriz sólida que transporta energia entrando em contacto alternativamente com os fluidos principais quente e frio. São exemplos deste tipo os permutadores utilizados em fornos e caldeiras para aquecer o ar para a combustão à custa dos produtos de combustão e os regeneradores nos ciclos de turbina de gás.

## 2) Tipo de construção

No caso de serem de contacto direto existe contacto entre os fluidos entre os quais se permuta calor. No caso de serem de contacto indireto podemos ainda ter transferência direta ou através de um sistema intermedio.

Em relação aos tipos de construção, os permutadores de contacto direto não são classificados sob este aspeto, sendo a sua constituição a de uma câmara onde se misturam os fluidos que permutam calor. Nos permutadores de contacto indireto a classificação faz-se em relação à forma da superfície sólida que separa os dois fluídos e através da qual se processa a transferência de calor. As superfícies de transferência são na maioria tubos ou placas sendo os permutadores classificados pela disposição destes elementos.

- **Construção tubular:** Resumidamente, consiste num casco que contém no seu interior um feixe de tubos (Figura 5). Um dos fluidos passa pelo casco (fluido do lado casco) e o outro pelo feixe de tubos (fluido do lado tubos), sendo a troca térmica realizada através das paredes dos tubos do feixe.

Eles trabalham de maneira ótima em aplicações de transferência de calor gás/gás, principalmente quando pressões e/ou temperaturas operacionais são muito altas onde nenhum outro tipo de permutador pode operar. Estes

permutadores podem ser classificados como carcaça e tubo, tubo duplo e de espiral.



Figura 5- Permutador de calor de construção tubular

○ **Permutadores de carcaça e tubo (shell and tube)**

Este permutador (Figura 6) é construído com tubos e uma carcaça. Um dos fluidos passa por dentro dos tubos, e o outro pelo espaço entre a carcaça e os tubos. Existe uma variedade de construções diferentes destes permutadores dependendo da transferência de calor desejada, do desempenho, da queda de pressão e dos métodos usados para reduzir tensões térmicas, prevenir vazamentos, facilidade de limpeza, para conter pressões operacionais e temperaturas altas, controlar corrosão, etc.

Permutadores de carcaça e tubo são os mais usados para quaisquer capacidade e condições operacionais, tais como pressões e temperaturas altas, atmosferas altamente corrosivas, fluidos muito viscosos, misturas de multicomponentes, etc. Estes são permutadores muito versáteis, feitos de uma variedade de materiais e tamanhos e são extensivamente usados em processos industriais.

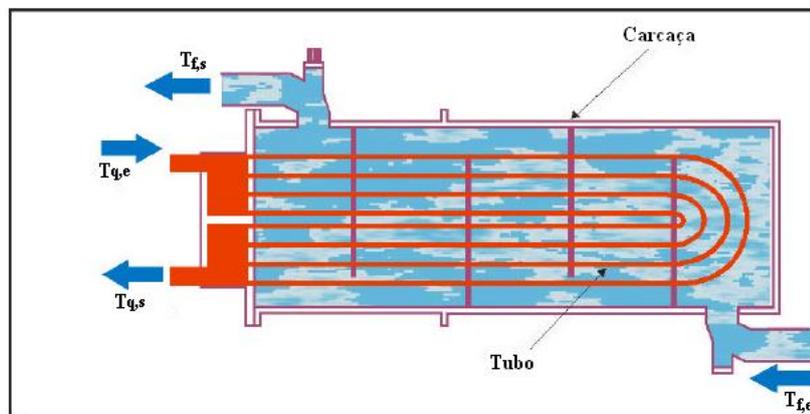


Figura 6- Permutador de calor carcaça e tubo

- **Permutador tubo duplo (double pipe)**

O permutador de tubo duplo (Figura 7) consiste de dois tubos concêntricos. Um dos fluidos escoam pelo tubo interno e o outro pela parte anular entre tubos, numa direção de contrafluxo. Este é talvez o mais simples de todos os tipos de permutador de calor pela fácil manutenção envolvida. É geralmente usado em aplicações de pequenas capacidades.

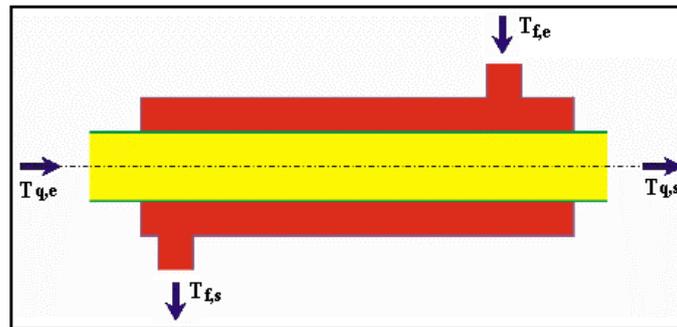


Figura 7- Permutador de calor de tubo duplo

- **Permutador de calor em serpentina**

Este tipo de permutador (Figura 8) consiste em uma ou mais serpentina (de tubos circulares) ordenadas dentro de uma carcaça. A transferência de calor associada a um tubo espiral é mais alta que para um tubo duplo. Além disso, uma grande superfície pode ser acomodada num determinado espaço utilizando as serpentinhas. As expansões térmicas não são nenhum problema, mas a limpeza é muito problemática.

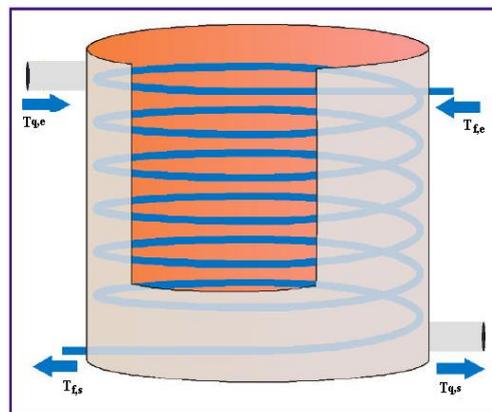


Figura 8- Permutador de calor em serpentina

- **Construção em placas:** Este tipo de permutador (Figura 9) normalmente é construído com placas lisas ou com alguma forma de ondulações montadas em série, com vedantes entre elas. Os fluidos trocam calor, passando em contracorrente, alternadamente, pela sequência de placas. Geralmente, este permutador não pode suportar pressões muito altas, comparado ao permutador tubular equivalente

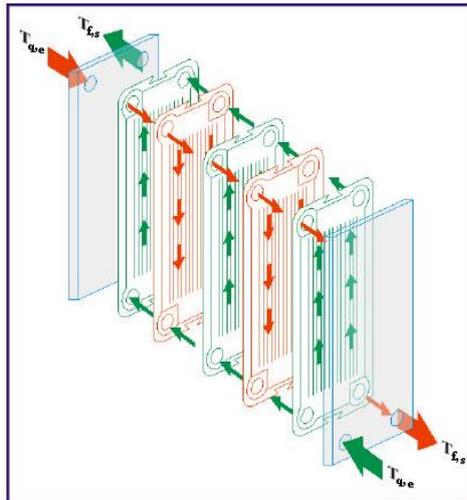


Figura 9- Permutador de calor de construção em placas

### 3) Tipo de escoamento

Relativamente ao tipo de escoamento estes podem ser de passagem simples ou passagens múltiplas.

**Passagens Simples:** Neste tipo de permutadores cada fluido tem escoamento uniforme apenas numa direção e sentido podendo ser classificados pela orientação relativa entre as correntes.

- Equicorrente, contra-corrente. Nestes casos ambos os fluidos deslocam-se na mesma direção, respetivamente no mesmo sentido ou em sentidos opostos.

- Correntes cruzadas onde os fluidos têm direção do escoamento perpendicular.

**Passagens Múltiplas:** Nestes permutadores um dos fluidos tem mais de um sentido de escoamento em relação ao outro ou diversas correntes. São exemplos.

- Configuração 2x1 em que a corrente de um dos fluidos tem duas passagens em sentidos opostos, uma em equicorrente e outra em contracorrente, em relação ao outro fluido que tem apenas uma passagem.

- Em permutadores com correntes cruzadas é usual existirem diversas passagens em série para um dos fluídos (em sentidos alternados) enquanto o outro fluido mantém sempre um escoamento perpendicular.

### **Cuidados a ter na operação de permutadores de calor**

No início, entra primeiro o fluido mais frio. Se o fluido mais frio está ligeiramente quente, deixa-se o mesmo, então, entrar de forma lenta. Quanto mais quente o fluido, mais lenta deve ser a sua penetração no permutador de calor. Quando termina o funcionamento, bloqueia-se primeiramente a entrada do fluido mais quente. Se isto não for observado, podem ocorrer vazamentos nos tubos.

Tanto no início como no fim do funcionamento, os permutadores de calor devem ser aquecidos ou arrefecidos lentamente. Isto é particularmente importante quando as temperaturas de operação são elevadas. A rápida entrada de um líquido a alta temperatura pode provocar desigualdades de expansão nos tubos, causando vazamentos nos mesmos e deformação do feixe.

Quando o fluido a arrefecer é muito quente, a interrupção da água provoca um grande aquecimento do equipamento.

Se a água voltar, então, a circular, haverá um arrefecimento brusco do permutador. Esta mudança rápida de temperatura afrouxa parafusos e abre as juntas.

Deve-se sempre drenar a água de um aquecedor para evitar o fenómeno chamado martelo hidráulico.

## Aplicações dos permutadores de calor

As aplicações que os permutadores podem ter, são muito diversificadas, podendo no entanto agruparem-se de acordo com a sua utilização. Referimos em seguida alguns exemplos dessas aplicações:

- **Grandes instalações:** Caldeiras de aquecimento e de geração de vapor
- **Com mudança de fase:** Geradores de vapor, Evaporadores, Condensadores.
- **Permuta de calor sem mudança de fase:** Aquecedores, arrefecedores
- **Recuperação de calor:** Recuperadores quando o calor aproveitado é para outra aplicação e regeneradores quando o calor é aproveitado no próprio ciclo térmico.
- **Dissipadores:** Radiadores, torres de arrefecimento. Nestes pretende-se apenas efetuar um arrefecimento não sendo utilizada a energia transferida para o outro fluido.

## **Capítulo 3 - Desenvolvimento do projeto**

Neste capítulo iremos descrever de uma forma pormenorizada todo o trabalho que foi feito em cada uma das oito etapas do nosso projeto

## **Etapa 1 – Seleção e recolha dos materiais**

Após ter sido feita uma recolha de informação acerca dos permutadores de calor e suas características foi necessário recolher todos os materiais para que o nosso projeto fosse desenvolvido. Na seleção dos materiais tivemos também em consideração as suas propriedades físicas no que toca à condutibilidade térmica e decidimos assim que todo o permutador deveria ser construído em cobre.

Começamos por procurar o material necessário para a construção da carcaça. Tal como tínhamos em mente, precisávamos de um tubo com um diâmetro considerável para lá dentro caberem os restantes componentes. Com a ajuda do professor orientador conseguimos adquirir três tubos que serviram para esse efeito. Para o interior do permutador aproveitamos um tubo que tinha sido utilizado anteriormente no sistema de aquecimento de um dos laboratórios mas que já estava inutilizado. Foi necessário também uma pequena chapa de cobre para construir as alhetas do interior do permutador e as partes exteriores da carcaça. Relativamente ao suporte que foi feito usamos algum material ferroso existente no armazém das oficinas. Quanto á parte do isolamento, utilizamos um tubo de policloreto de vinil (PVC) que se encontrava no laboratório e lâ de rocha se bem que essa teve que ser comprada. Foi também necessário adquirir duas curvas de cobre com um angulo de 90° e 1.5 cm de diâmetro interno.

Para a construção do projeto foi necessária a utilização de diversas ferramentas que se encontravam nas oficinas, de salientar as mais importantes:

- Maçarico de oxiacetileno;
- Aparelho de soldar TIG;
- Engelho de furar;
- Cortadora de Pendulo;
- Rebarbadora;
- Aparelho de soldar MIG;

## Etapa 2 - Construção da carcaça do permutador

Após termos adquirido todos os materiais necessários foi altura de iniciar a construção do projeto.

Em primeiro lugar optámos por construir a carcaça do permutador. Para isso usámos três tubos de cobre (Figura 10) tal como tinha sido descrito anteriormente com um diâmetro de 5 cm. Como estes tubos já tinham tido algum uso apresentavam alguns restos de tinta e alguma sujidade que foi necessário remover antes de se proceder à soldadura. Para isso usamos uma escova de arame, um raspador e alguns bocados de lixa para conseguirmos retirar todos esses resíduos e deixar o material limpo e com um aspeto uniforme pronto para ser soldado (Figura 11)



Figura 10-Tubos de cobre



Figura 11- Tubos de cobre já limpos

Após ter sido concluído o processo de limpeza começámos a fazer as soldaduras necessárias para unir os três tubos e formar um só.

Inicialmente, optámos por usar um maçarico de oxiacetileno (Figura 12) e uma vareta de cobre como metal de adição para efetuarmos as soldaduras mas como a carcaça tinha que ficar totalmente estanque repensámos no método que estávamos a utilizar e decidimos que seria mais vantajoso utilizar o processo de soldadura tungsténio inerte gás (TIG) (Figura 13) pois este permite fazer uma soldadura com um acabamento mais uniforme.



Figura 12 - Soldadura com oxiacetileno



Figura 13- Soldadura com TIG

### Etapa 3 – Soldadura das ligações exteriores

Após ter sido concluído o processo de soldadura da carcaça foi necessário fazer as ligações por onde o fluido irá passar. Para isso foi necessário fazer dois furos na carcaça e em seguida soldar duas curvas de cobre com um angulo de 90° (Figura 14) juntamente com umas pequenas pontas de tubo (Figura 15).

O objetivo deste processo é permitir uma fácil ligação dos tubos que irão transportar o fluido.



Figura 14 - Curvas de cobre



Figura 15- Curvas de cobre soldadas

### Etapa 4 – Construção da parte interior do permutador

Após construir a carcaça do permutador foi necessário construir um sistema para colocar dentro dessa mesma carcaça de forma a fazer circular o fluido mais quente proveniente dos painéis PVT.

Para isso utilizamos um tubo de cobre com 1.5cm de diâmetro (Figura 16) onde posteriormente foram soldadas perpendicularmente ao tubo um conjunto de 21 alhetas com 3.5 cm de diâmetro (Figura 17), espaçadas uniformemente.



Figura 16- Tubo de cobre



Figura 17- Alhetas

Estas alhetas foram obtidas através do corte e perfuração de uma chapa de cobre (Figura 18) com cerca de 2mm de espessura e têm como objetivo aumentar a área de transferência de calor entre os dois fluidos. Terminada esta etapa tínhamos a parte interior do permutador já concluída. (Figura 19).



Figura 18- Chapa de cobre



Figura 19- Alhetas já colocadas

## Etapa 5 – Construção das extremidades da carcaça

Para construir as extremidades da carcaça foi necessário cortar duas chapas circulares (Figura 20) da mesma medida do diâmetro exterior do tubo.

Após termos as chapas cortadas foi necessário para fazer um furo ao centro em cada uma delas por onde vai passar o tubo interior do permutador que contém as alhetas. Soldamos a primeira chapa num dos lados e em seguida introduzimos o tubo que contém as alhetas lá dentro. Após isso colocámos a outra chapa e soldamos. As soldaduras foram feitas de forma a unir as chapas à carcaça e ao tubo que contém as alhetas (Figura 21).

O objetivo desta etapa é fazer com que o permutador fique completamente selado e não haja qualquer fuga do fluido para o exterior.



Figura 20- Chapa circular de cobre



Figura 21- Permutador acabado

### Etapa 6 – Construção do suporte

Após a construção do permutador estar concluída foi necessário construir um suporte para o mesmo (Figura 22). Para isso usamos uma barra de ferro de perfil I e soldámos duas pontas de tubo de 1.5cm de diâmetro. Cortámos um tubo de 5.5cm de diâmetro ao meio para servir de apoio para o permutador. Nesta etapa visto estarmos a trabalhar com ferro em vez de cobre optamos por utilizar o equipamento MIG para efetuarmos todas as soldaduras necessárias.



Figura 22- Permutador com o suporte

## Etapa 7 – Testes

Depois do permutador e o respetivo suporte estarem concluídos foi altura de testar o comportamento do permutador na presença de um fluido (neste caso foi usada água) (Figura 23).



Figura 23- Teste com água

Foi usada uma pequena bomba elétrica alimentada por uma bateria de 12v para fazer circular o fluido (Figura 24). Após terem sido feitas todas as ligações das tubagens e da bomba efetuaram-se os testes. Inicialmente o permutador apresentava algumas fugas provenientes de pequenos poros que estavam nas soldaduras. Foi necessário marcar o sítio exato das fugas pois não eram visíveis a olho nu, e posteriormente foi necessário voltar a soldar. Após alguns testes finalmente se conseguiu que o permutador ficasse totalmente estanque.

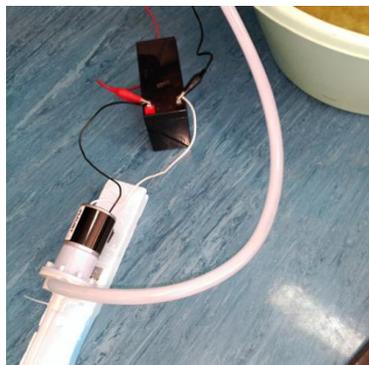


Figura 24- Bomba e bateria

## Etapa 8 – Construção do isolamento

Após terem sido feitos os testes e se ter verificado que o permutador estava totalmente estanque e não havia nenhuma fuga foi necessário construir uma “capa protetora”. O objetivo desta “capa” é impedir que quando o permutador estiver em funcionamento o calor se perca para a atmosfera e diminua o rendimento do equipamento. Para fazer esta

capa protetora foi usado um tubo de PVC com 89.5 cm de diâmetro (Figura 25) que posteriormente foi cortado ao meio. No interior deste tubo foi colocada uma camada de lã de rocha (Figura 26) e revestida com fita-cola (Figura 27). Para o equipamento ficar totalmente isolado foram cortadas duas circunferências em roofmate (Figura 28) com o diâmetro do tubo de PVC e em seguida foram feitos furos nos locais onde estavam os tubos de cobre do permutador.



Figura 25- Tubo de PVC



Figura 26- Lã de rocha

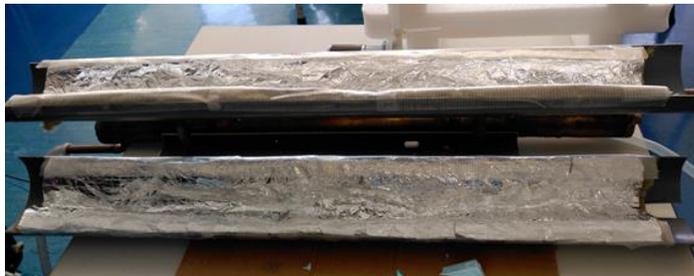


Figura 27- Parte interior do isolamento

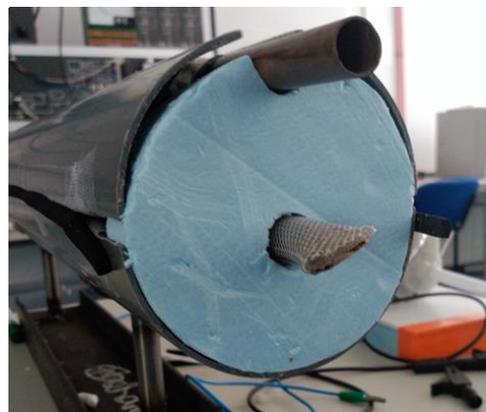


Figura 28- Circunferências de roofmate

## Etapa 9 – Fórmulas e cálculos

Depois de termos concluído com sucesso todas as fases da construção do permutador de calor, existe a necessidade de efetuar alguns cálculos com o objetivo de calcular a área de transferência de calor por ele libertado. Esta medida vai-nos permitir saber qual a eficiência que este componente vai ter durante o seu funcionamento.

### Fórmulas necessárias:

#### Fórmula para o cálculo da quantidade de calor

$$Q = U \cdot A \cdot (\Delta T)_{ml}$$

Em que:

Q- Quantidade de calor (W)

U- Coeficiente de transferência de calor (W/m<sup>2</sup>.°C)

A- Área de transferência de calor (m<sup>2</sup>)

$\Delta T_{ml}$ - Diferença de temperatura média logarítmica (°C)

#### Fórmula para o cálculo da diferença de temperatura média logarítmica

$$(\Delta T)_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

Em que:

$\Delta T_{ml}$ - Diferença de temperatura média logarítmica

$\Delta T_1$ - Diferença de temperatura no plano 1

$\Delta T_2$ - Diferença de temperatura no plano 2

**Fórmula para o cálculo da área do tubo**

$$A_{\text{tubo}} = 2\pi \cdot r_e \cdot L$$

Em que:

$A_{\text{tubo}}$ - Área do tubo

$r_e$ - Raio exterior

L- Comprimento

**Fórmula para o cálculo da área do círculo**

$$A = \pi r^2$$

Em que:

A- Área

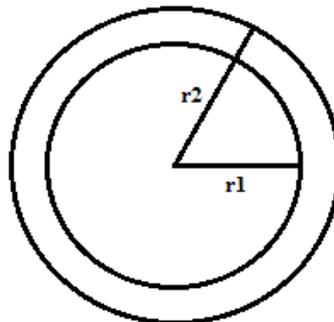
r- Raio do círculo

**Fórmulas para calcular a área das alhetas**

$$A_1 = \pi r_1^2$$

$$A_2 = \pi r_2^2$$

$$A_{\text{alhetas}} = A_2 - A_1$$



**Fórmulas para calcular a área total do permutador de calor**

$$A_{\text{total P.C}} = A_{\text{tubo}} + A_{\text{alhetas}}$$

**Cálculos**

$$A_{\text{tubo}} = 2\pi \cdot r \cdot L \Leftrightarrow A_{\text{tubo}} = 2\pi \times 0.75 \times 80.5 \Leftrightarrow A_{\text{tubo}} = 379.347 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{alhetas}} = A_2 - A_1$$

$$A_1 = \pi r^2 \Leftrightarrow A_1 = \pi \times 0.75^2 \Leftrightarrow A_1 = 1.767 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = \pi r^2 \Leftrightarrow A_2 = \pi \times 1.75^2 \Leftrightarrow A_2 = 9.621 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{Alhetas}} = A_2 - A_1 \Leftrightarrow A_{\text{Alhetas}} = 9.621 - 1.767 = 7.854 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{total alhetas}} = A_{\text{Alhetas}} \times 21 \Leftrightarrow A_{\text{total alhetas}} = 7.854 \times 21 = 164.934 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{total P.C}} = A_{\text{tubo}} + A_{\text{alhetas}} \Leftrightarrow A_{\text{total P.C}} = 379.347 + 164.934 = 544.281 \text{ cm}^2 = 0.0544 \text{ m}^2$$

Após os cálculos efetuados concluímos que a área de transferência de calor do permutador é de aproximadamente  $0.0544 \text{ m}^2$ .

## Referências finais

Após termos concluído todas as etapas com sucesso, estamos em condições de fazer uma breve apreciação a todo o trabalho desenvolvido.

Em geral, todas as etapas correram como previsto e não houve grandes dificuldades em alcançar os objetivos. Deparamo-nos apenas com um problema: quando fizemos os testes, apercebemo-nos que as soldaduras estavam com pequenas imperfeições que, embora não fossem visíveis, permitiam alguma saída de água do permutador. Após terem sido corrigidas, este ficou totalmente estanque e pronto para ser utilizado.

Depois de construído o permutador, tivemos que definir como este iria funcionar. Para isso, fizemos uma pequena pesquisa e obtivemos os gráficos apresentados na figura 29 (retirado de [www.marioloureiro.net/ensino/manuais/.../PERMUTADORES1313EFA](http://www.marioloureiro.net/ensino/manuais/.../PERMUTADORES1313EFA), em 12 de novembro 2015).

Ao observar os gráficos, concluímos que a diferença de temperaturas médias entre os fluidos no caso de correntes opostas é superior ao de correntes paralelas, o que faz com que o de correntes opostas seja mais eficiente. Por este motivo, definimos que o permutador por nós construído deve funcionar num regime em que os fluidos vão circular em correntes opostas. Esta indicação será dada a quem fizer a aplicação deste equipamento.

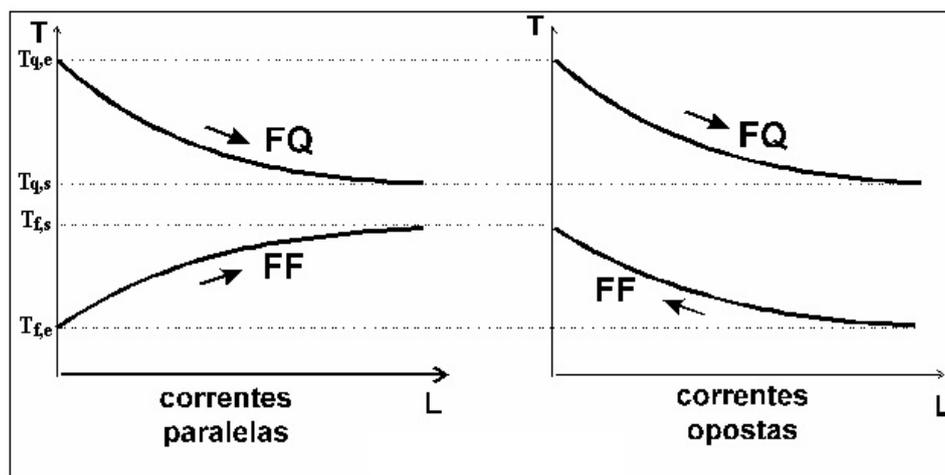


Figura 29- Gráficos de leitura de temperaturas

Como produto final obtivemos o apresentado na figura 30 e na figura 31.



Figura 30- Esquema do permutador Finalizado



Figura 31- Permutador Finalizado

## Capítulo 4 - Conclusão

## Conclusão

Após termos terminado o trabalho, e termos feito uma análise geral do mesmo, compete-nos referir de forma conclusiva que:

- No âmbito geral, os objetivos que nos propusemos alcançar, e que foram descritos na Introdução, foram alcançados com sucesso. O permutador de calor foi construído e testado e deste obtivemos os resultados esperados.
- Com todo o trabalho por nós realizado ao longo das várias etapas, concluímos que os conhecimentos teóricos que nos foram lecionados ao longo dos três anos de curso, foram os pilares estruturantes na execução deste projeto.
- Podemos concluir também que a relação entre o contexto académico e o contexto real está diretamente relacionado, pois, embora este projeto tenha sido desenvolvido numa disciplina de final de curso o seu produto final terá uma aplicação prática.

Esperamos que quem leu o presente relatório tenha ficado com alguma curiosidade sobre o desenvolvimento de novos equipamentos a serem utilizados no âmbito das energias renováveis.

## Web grafia

Fábio Ferraz, Trocadores de Calor.pdf, Disponibilizado em:

<<https://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/1trocadores-de-calor.pdf>> - Acedido em 4 de setembro 2015;

João Luís Toste Azevedo, Apontamentos de Permutadores de Calor – Equipamentos Térmicos 2005, Disponibilizados em:

<<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571244141/Permutadores1C.pdf>> – Acedido em 4 de setembro 2015;

Luís Roriz, Permutadores, Disponibilizados em:

<<http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/MyPage/permutadores.htm>> – Acedido em 10 setembro 2015;

<http://www.hrs-heatexchangers.com/pt/recursos/como/projeto-de-um-trocador-de-calor-tubular.aspx> – Acedido em 12 de setembro 2015;

Paulo Rocha Viana, Curso de Engenharia Mecânica, Disponibilizado em: <http://ec2-107-21-65-169.compute1.amazonaws.com/content/ABAAAgwpoAB/avaliacao-experimental-coletor-solar-pvt?part=2> – Acedido em 21 de setembro 2015;

Mário Loureiro, PERMUTADORES1313EFA, Disponibilizado em:

<<http://www.marioloureiro.net/ensino/manuais/.../PERMUTADORES1313EFA>> – Acedido em 12 de novembro 2015.