

# **Optimização de uma distribuição em Z para aplicação a colectores solares planos**

*Delfim Manuel Castanheira Valente*

**Relatório do projecto final do MIEM**

Orientador na FEUP: Prof. Jorge Facão



# **FEUP**

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho de 2008

## Resumo

A distribuição do fluido no colector solar influencia a sua eficiência. Quanto mais uniforme for a distribuição maior é a eficiência do colector. Para melhorar a uniformidade da distribuição é necessária a optimização dos canais de entrada e de saída do colector.

Este trabalho tem como principal objectivo a optimização do canal de entrada e do canal de saída, de um colector solar plano, com a sua configuração da rede de canais em Z. Para isso foi construído um programa de cálculo com base em correlações para as perdas de carga em linha e perdas de carga localizadas disponíveis em Idelchik [1]. Com a associação de resistências hidráulicas conseguiu-se modelar o escoamento, mas não foram levados em conta quaisquer efeitos provocados pela transferência de calor. Esse programa de cálculo foi implementado no software EES (Engineering Equation Solver).

Posteriormente e com o intuito de validar a solução obtida através do EES foi feita uma simulação com base na dinâmica dos fluidos computacional através do software Fluent. Com os dados geométricos fornecidos pelo EES foi gerada uma malha no software, Gambit. Seguidamente foram definidos os parâmetros fundamentais para o modelo de cálculo e obtida uma solução do Fluent. Para a validação dos resultados foram comparadas as velocidades médias em cada tubo absorvedor, obtidas através dos dois modelos de cálculo. Foi também feita uma simulação para o caso de um colector comum (não-optimizado) e comparada com a solução optimizada. Foi ainda feito um estudo da independência da solução relativamente à malha utilizada.

Conclui-se que o programa de cálculo implementado no EES era válido para caracterizar o escoamento com uma precisão aceitável para o objectivo do trabalho. Por fim verificou-se também que havia de facto, uma melhoria significativa na uniformidade da distribuição do fluido quando se procedia á optimização dos canais de entrada e de saída do colector solar.

## Optimization of a Z distribution for application in flat-plate solar collectors

### **Abstract**

The flow distribution in a solar collector affects its efficiency. Higher uniformity in the distribution increases the efficiency in the collector. To improve the uniformity in the distribution is necessary to optimize the inlet and outlet channel of the collector.

The main objective of this work is to optimize the inlet channel and the outlet channel of a flat-plate solar collector with a Z configuration in the network of channels. To do that, a calculation program was built, with base in correlations for the linear pressure losses and local pressure losses available in Idelchik. With the association of hydraulic resistances was possible to simulate the flow, but the effects caused by the heat transfer were neglected. This calculation program was implemented in the software EES (Engineering Equation Solver).

A simulation, with base on CFD (computacional fluid dynamics) was made to validate the results obtained from the EES, in the software Fluent. With the geometric data available by the EES a grid was built in the software Gambit. Next task was to define the fundamental parameters to the calculation model and obtain a solution from Fluent. To validate the results, a comparison of the mean velocities in the absorber tubes, given by the two calculation models, was made. Also, a simulation was made to the case of a common solar collector (non-optimized), and compared with the solution of the optimized solar collector. Was still made a study of the solution independence from the utilized grid.

The calculation program, implemented in EES was appropriated to describe de flow with an acceptable precision to the objective of the work. In the end, was also verified, that in fact, the optimization of the inlet and outlet channel gave a significant improvement in the uniformity of the flow distribution.

## Índice

1. Introdução.....	1
2. Revisão bibliográfica.....	3
3. Optimização dos canais de entrada e de saída do colector solar.....	5
4. Simulação do escoamento no colector solar	
4.1. Geração da malha.....	17
4.2. Simulação no Fluent.....	20
5. Resultados	
5.1. Independência da solução da malha utilizada.....	24
5.2. Validação da solução obtida no EES com a solução obtida no Fluent.....	25
5.3. Influência da variação da temperatura na distribuição de velocidades do colector optimizado.....	26
5.4. Análise do efeito da optimização na distribuição das velocidades.....	27
5.5. Discussão dos resultados obtidos devido à optimização da distribuição do caudal....	28
6. Conclusões.....	33
7. Referências e bibliografia.....	34
Anexo A: Localização dos coeficientes em Idelchik.....	36
Anexo B: Qualidade das malhas geradas.....	37
Anexo C: Evolução gráfica dos resíduos.....	39

## Nomenclatura

$d$	diâmetro genérico (m)
$D$	diâmetro (m)
$f$	coeficiente de perda de carga em linha
$l$	comprimento genérico (m)
$L$	comprimento parcial (m)
$nc$	número de canais
$Re$	número de Reynolds
$U$	velocidade no tubo absorvedor (m/s)
$\bar{U}$	velocidade média (m/s)
$v$	velocidade genérica (m/s)
$V$	velocidade (m/s)

## Símbolos gregos:

$\Delta p$	perda de carga (Pa)
$\mu$	viscosidade dinâmica (kg/m.s)
$\rho$	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
$\Delta U$	desvio padrão relativo da velocidade
$\bar{\varepsilon}_{rel}$	erro relativo médio
$\zeta$	coeficiente de perda de carga localizada

## Índices:

$c$	relativo ao tubo absorvedor
$e$	entrada
$i$	relativo á corrente de fluido que passa no tubo $i$
$nc$	relativo á corrente de fluido que passa no último tubo
$s$	saida
$w$	extra-espaco
$1$	relativo á corrente de fluido que passa no 1º tubo absorvedor

# Capítulo 1

## Introdução

A eficiência de colectores solares planos é fortemente condicionada pela distribuição do fluido através dos tubos absorvedores de calor. Trabalhos anteriores mostraram que a eficiência do colector solar diminui à medida que diminui a uniformidade na distribuição do fluido nos tubos absorvedores. Uma distribuição uniforme corresponde a uma eficiência mais elevada. No entanto, distribuições não uniformes de fluido podem-se encontrar em diversos colectores solares comerciais. Uma melhoria na uniformidade da distribuição do fluido pode ser conseguida através do correcto dimensionamento do canal de entrada e do canal de saída, sem incrementar muito os custos de produção do colector solar nem a perda de carga total.

Este trabalho consistiu em construir um programa de cálculo, que tinha como principal objectivo, determinar as dimensões óptimas do canal de entrada e do canal de saída, de maneira a garantir uma maior uniformidade na distribuição do caudal pelo colector solar de placa plana estudado, mostrado na figura 1. O programa de cálculo teve como base correlações para as perdas de carga localizadas e perdas de carga em linha disponíveis em Idelchik[1]. Com a associação de resistências hidráulicas consegue-se facilmente modelar o escoamento na rede de canais do colector. Foram ignorados todos os efeitos causados pela transferência de calor. Foi considerado que o escoamento se encontrava sob condições laminares. O software utilizado para resolver o cálculo de optimização foi o EES (Engineering Equation Solver).

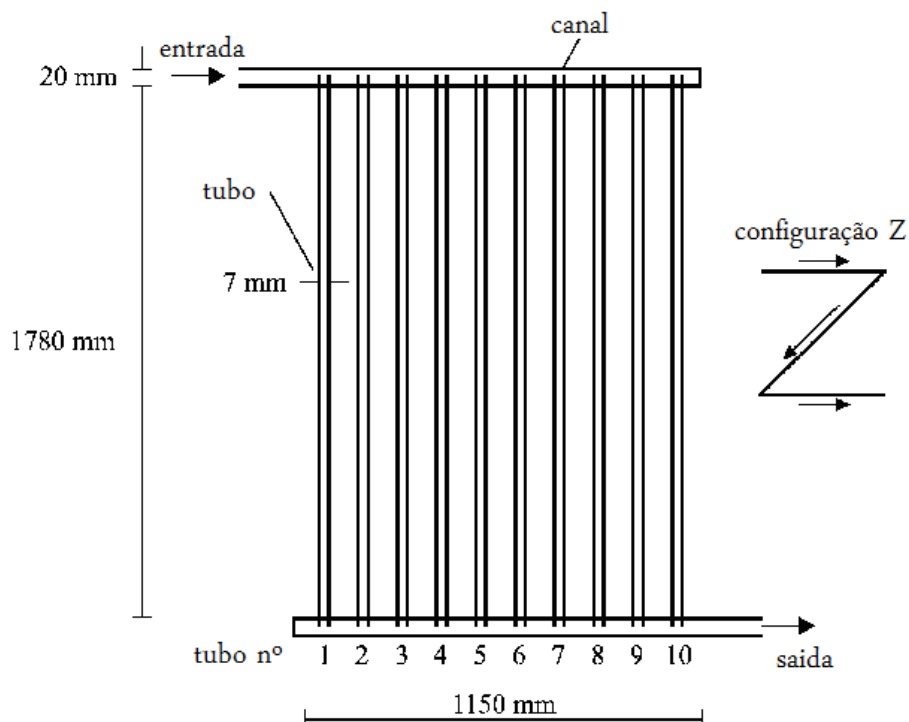


Figura 1 – Colector solar plano com configuração em Z

Posteriormente para validar os resultados obtidos no EES foi efectuado um estudo com a ajuda do software de dinâmica de fluidos computacional (CFD), Fluent. Os dados utilizados para a comparação dos resultados foram as velocidades médias dos vários tubos absorvedores do colector solar e também a perda de carga total. Depois de executada a optimização dos canais de entrada e de saída e obtidos os dados relevantes, foi então utilizado o Software Gambit para definir a geometria da rede de canais do colector, com os canais de entrada e de saída agora optimizados e construir a respectiva malha. Seguidamente elaborou-se um modelo no Fluent que levou então em consideração os efeitos causados pela transferência de calor.

Neste relatório serão apresentadas em primeiro lugar as equações utilizadas para a optimização dos canais de entrada e de saída do colector. De seguida é explicado como foi construída a malha no programa Gambit e depois são apresentados os parâmetros definidos na simulação efectuada no software Fluent. Finalmente são apresentados os resultados onde se compara as soluções obtidas no EES e no Fluent para o colector com os canais optimizados. É também mostrada a comparação dos resultados entre o colector optimizado e o não-optimizado no software Fluent. Por fim são apresentadas algumas conclusões e possíveis trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### Revisão bibliográfica

Trabalhos anteriores foram levados a cabo em prol de um maior conhecimento no comportamento de colectores solares. O interesse centrou-se principalmente na distribuição do fluido através dos canais do colector solar e das respectivas consequências dessa distribuição. Várias configurações de colectores solares foram estudadas, assim como diferentes regimes de escoamento e diferentes condições, tanto interiores como exteriores, a que os colectores solares estavam sujeitos. Algumas destas investigações foram naturalmente uma ajuda para este trabalho. Portanto, de seguida é resumido o desenvolvimento dos trabalhos anteriormente realizados:

- ✓ Em 1990 Wang e Wu[2] apresentaram a distribuição do caudal em colectores solares, com efeitos térmicos tais como condução de calor longitudinal e flutuações. Ambos os colectores com configuração do tipo U e com configuração do tipo Z foram investigados.
- ✓ Em 1992 Shen[3] estudou a mal-distribuição do caudal nos canais de entrada e de saída devido aos efeitos de fricção.
- ✓ Em 1994 Jones e Lior[4] apresentaram as investigações numéricas da distribuição do caudal em colectores solares, sem considerar os efeitos térmicos.
- ✓ Em 1996 e 2002 Gunnewiek et al. investigaram a distribuição de caudal em colectores solares planos a ar, sem vidro transparente, de grande área, sem[5] e com[6] o efeito do vento. As investigações foram levadas a cabo por meio do programa de CFD comercial TASCFlow. Mostraram que o escoamento de ar através da superfície do colector não é uniformemente distribuído devido aos efeitos de flutuação e esse escoamento exterior de ar pode ocorrer apenas em parte da superfície do colector solar se a sucção de caudal for suficientemente baixa.
- ✓ Em 2002 Weitbrecht et al.[7] investigaram a distribuição do caudal, em condições isotérmicas, de colectores solares em regime laminar de escoamento, por meio de medições LDV (laser Doppler velocimetry) e análise numérica.



- ✓ Em 2004 Tonomura et al.[8] e Delsman et al.[9] apresentaram um trabalho para o dimensionamento da geometria dos canais de entrada e de saída de um microreactor, para a obtenção de uma distribuição uniforme de caudal. Eles apresentaram um estudo paramétrico baseado em simulações de CFD. Concluíram que se o canal de saída tiver um extra-espaço relativamente ao canal de entrada, isso dará a melhor uniformidade possível ao escoamento.
  
- ✓ Em 2006 Facão e Gruss[10] desenvolveram um modelo que levou em conta as perdas de carga locais e por fricção. Esse modelo possibilitou o dimensionamento e a optimização da geometria dos canais de entrada e de saída. A distribuição do caudal e a perda de carga global foram comparadas a simulações de CFD e a medições experimentais com uma nova técnica.
  
- ✓ Em 2007 Fan et al.[11] investigaram o escoamento e a distribuição da temperatura em um painel solar com a placa absorvedora inclinada, constituída por faixas horizontais. O escoamento do fluido e a transferência de calor foram estudados por meio de cálculos de CFD.

Neste trabalho será construído um programa de cálculo de optimização da geometria dos canais de entrada e de saída de um colector solar plano com a configuração em Z, baseado em correlações para as perdas de carga em linha e perdas de carga localizadas. Esse programa de cálculo será implementado no software EES. Posteriormente a solução anterior será validada com um modelo numérico de dinâmica dos fluidos computacional. Esse modelo numérico será efectuado no software Fluent. Serão analisadas e comparadas as velocidades nos tubos absorvedores e as perdas de carga no colector.

## Capítulo 3

### Optimização dos canais de entrada e de saída do colector solar

Um programa de cálculo para optimização dos canais de entrada e de saída do colector solar foi implementado no software EES. Analisando o sistema de canais do colector solar foi constatado que estávamos perante um caso de escoamento paralelo. Esse tipo de escoamento pode ser traduzido pela seguinte expressão (os sub-índices estão definidos na figura 2):

$$\Delta p_1 = \Delta p_i = \Delta p_{nc} \quad (1)$$

$\Delta p$  é a perda de carga que é composta por duas componentes: a perda de carga em linha, devido ao atrito das paredes e as perdas de carga localizadas, devido á inércia nas mudanças de direcção da corrente de fluido. Para a definição das perdas de carga nos diferentes canais do colector foram utilizadas correlações. Para a perda de carga em linha (em regime laminar e numa tubagem circular) foi usada a expressão seguinte, disponível em White[12]:

$$\Delta p^{linha} = \frac{32 \cdot \mu \cdot l \cdot v}{d^2} \quad (2)$$

Para a perda de carga localizada foram utilizadas correlações disponíveis em Idelchik[1]. Tais correlações serão apresentadas e devidamente explicadas, ainda nesta secção, aquando da apresentação do modelo de cálculo.

Para o valor de caudal normalmente usado num colector com as dimensões do estudado, o regime de escoamento laminar é o mais frequente ao longo de todo o sistema de canais. Não obstante, em algumas zonas do escoamento também se verifica um comportamento transitório e turbulento. Posteriormente, serão validadas as afirmações anteriores. Posto isto, todas as correlações adoptadas para o modelo de cálculo foram para escoamentos em regime laminar.

Na figura 2 é apresentado o modelo geométrico considerado, e a respectiva nomenclatura, utilizados para a construção do programa de cálculo:

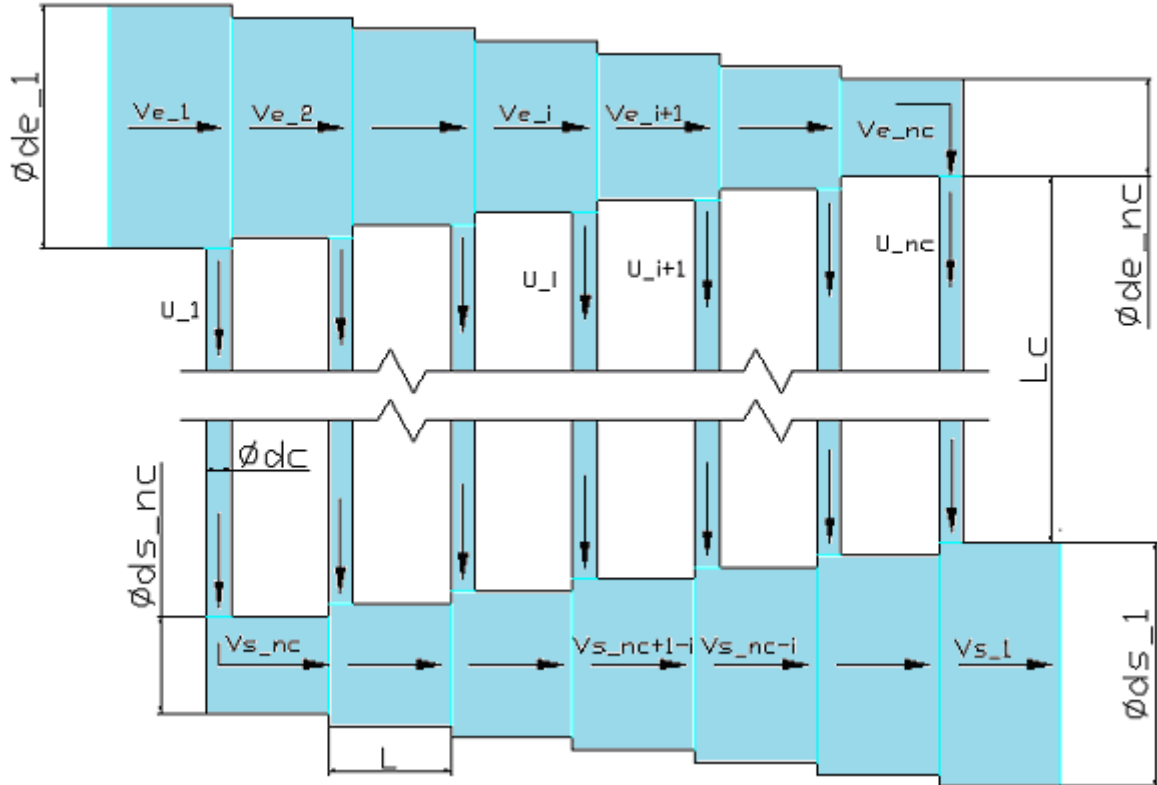


Figura 2 – Geometria da rede de canais do coletor solar.

As equações apresentadas de seguida compõem então o programa de cálculo para a optimização dos canais de entrada e de saída do coletor. Todos os valores dos coeficientes ( $k_1, A', A, a_0$  e  $\tau_{st}, C_1, A^{90^\circ}, \xi_{loc}$ ) que apareçam nas equações relativas às perdas de carga localizadas foram retirados do Idelchik[1]. Estes coeficientes são função: da razão entre as áreas dos canais em causa e da razão entre os respectivos caudais que circulam nos canais. Para uma maior facilidade na pesquisa destes coeficientes encontra-se no anexo A tabelas que indicam onde estão localizados os coeficientes em Idelchik.

Estas primeiras equa es apresentadas são relativas à perda de carga do fluido que percorre o caminho, desde a entrada até   saída, pelo 1  tubo absorvedor. Na figura 3 podemos ver o caminho tomado pelo fluido havendo assim uma melhor compreensão relativamente às perdas de carga localizadas a que o fluido está sujeito.

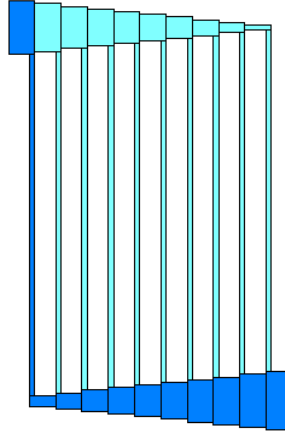


Figura 3 – Caminho percorrido pela corrente de fluido que passa no 1  tubo.

$$\Delta p_1 = \Delta p_1^{linha} + \Delta p_1^{localizada} \quad (3)$$

$$\Delta p_1^{linha} = 32\mu \left( \frac{LV_1^e}{(D_1^e)^2} + \frac{L_c U_1}{D_c^2} + \sum_{j=1}^{nc} \frac{LV_j^s}{(D_j^s)^2} \right) \quad (4)$$

Para a perda de carga localizada do fluido neste primeiro caso, dividi-a em três componentes, como se pode constatar da equa o (5). Uma primeira relativa   divergência de parte do caudal de entrada para o 1  tubo, uma segunda relativa   mudança de direc o do caudal de 90  para a entrada do canal de saída e uma terceira relativa   convergência dos caudais que vêm do 2  tubo até ao 10  tubo com o caudal do canal de saída.

$$\Delta p_1^{localizada} = \Delta p_1^{loc,div} + \Delta p_1^{loc,90^\circ} + \Delta p_1^{loc,conv} \quad (5)$$

$$\Delta p_1^{loc,div} = \frac{1}{2} \rho (V_1^e)^2 \left( (k_1 + 1) A \left( 1 + \left( \frac{U_1}{V_1^e} \right)^2 \right) + \frac{150\mu}{\rho V_1^e D_1^e} \right) \quad (6)$$

Sendo  $k_1 = 1$  e  $A = 1,1 - 0,7 \left( \frac{U_1 D_c^2}{V_1^e (D_1^e)^2} \right)$

$$\Delta p_1^{loc,90^\circ} = \frac{1}{2} \rho U_1^2 C_1 A^{90^\circ} \zeta_{local} \quad (7)$$

Sendo  $C_1 = 1$ ,  $A^{90^\circ} = 1,2$  e  $\zeta_{local} = 0,99$

$$\Delta p_1^{loc,conv} = \frac{1}{2} \rho \sum_{j=1}^{nc-1} (V_j^s)^2 \left[ 2 \left( 2A \left( 1 + \left( \frac{U_{nc+1-j}}{V_j^s} \right)^2 - 2 \left( \frac{D_{j+1}^s}{D_j^s} \right)^2 \left( \frac{V_{j+1}^s}{V_j^s} \right)^2 \right) + \frac{150\mu}{\rho V_j^s D_j^s} \right) + \right. \\ \left. + a_0 \left( 1 - \left( \frac{D_c}{D_j^s} \right)^2 \left( \frac{U_{nc+1-j}}{V_j^s} \right) \right)^2 - \left( 1,6 - 0,3 \left( \frac{D_c}{D_j^s} \right)^2 \right) \left( \frac{U_{nc+1-j}}{V_j^s} \right)^2 \right] \quad (8)$$

$$\text{Sendo } A = 1 \text{ e } a_0 = 1,8 - \left( \frac{U_{nc+1-j} D_c^2}{V_j^s (D_j^s)^2} \right)$$

As equa es seguintes apresentadas são relativas às perdas de carga do fluido que passa desde o 2  tubo absorvedor até ao penúltimo tubo. Novamente, na figura 4 podemos ver o caminho tomado pelo fluido havendo assim uma melhor compreensão relativamente às perdas de carga localizadas a que o fluido está sujeito.

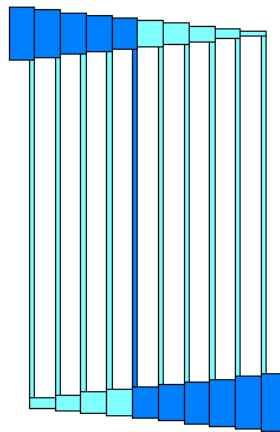


Figura 4 – Caminho percorrido pela corrente de fluido que passa no tubo i.

$$\Delta p_i = \Delta p_i^{linha} + \Delta p_i^{localizada} \quad (9)$$

$$\Delta p_i^{linha} = 32\mu \left( \sum_{j=1}^i \frac{LV_j^e}{(D_j^e)^2} + \frac{L_c U_i}{D_c^2} + \sum_{j=1}^{nc-i+1} \frac{LV_j^s}{(D_j^s)^2} \right) \quad (10)$$

Para a perda de carga localizada do fluido neste segundo caso, foi feita uma divisão em quatro componentes, como se pode constatar da equa o (11). Uma primeira relativa   divergência do caudal do canal de entrada dos tubos 1 até  $i-1$ , anteriores ao tubo  $i$  considerado, uma segunda relativa   divergência de parte do caudal do canal de entrada para o tubo  $i$  adjacente, uma terceira relativa convergência do caudal do canal de saída com o tubo  $i$  adjacente e uma quarta relativa   convergência dos caudais dos tubos  $i+1$  até 10, posteriores ao tubo  $i$  considerado, com o caudal do canal de saída.

$$\Delta p_i^{localizada} = \Delta p_i^{loc,div,ant} + \Delta p_i^{loc,div} + \Delta p_i^{loc,conv} + \Delta p_i^{loc,conv,post} \quad (11)$$

$$\Delta p_i^{loc,div,ant} = \frac{1}{2} \rho \sum_{j=1}^{i-1} (V_j^e)^2 \left( 3 \left( \tau_{st} \left( \frac{U_j D_c^2}{V_j^e D_j^e} \right)^2 \right) + \frac{33\mu}{\rho V_j^e D_j^e} \right) \quad (12)$$

Sendo  $\tau_{st} = 0,4$

$$\Delta p_i^{loc,div} = \frac{1}{2} \rho (V_i^e)^2 \left( (k_1 + 1) A \left( 1 + \left( \frac{U_i}{V_i^e} \right)^2 \right) + \frac{150\mu}{\rho V_i^e D_i^e} \right) \quad (13)$$

Sendo  $k_1 = 1$  e  $A = 1,1 - 0,7 \left( \frac{U_i D_c^2}{V_i^e (D_i^e)^2} \right)$

$$\Delta p_i^{loc,conv} = \frac{1}{2} \rho (V_{nc-i+1}^s)^2 \left( 2 \left( A \left( 1 + \left( \frac{U_i}{V_{nc-i+1}^s} \right)^2 \right) - 2 \left( \frac{D_{nc-i+2}^s}{D_{nc-i+1}^s} \right)^2 \left( \frac{V_{nc-i+2}^s}{V_{nc-i+1}^s} \right)^2 \right) + \frac{150\mu}{\rho V_{nc-i+1}^s D_{nc-i+1}^s} \right) \quad (14)$$

Sendo  $A = 1$

$$\Delta p_i^{loc,conv,post} = \frac{1}{2} \rho \sum_{j=1}^{nc-i} (V_j^s)^2 \left[ 2 \left( 2A \left( 1 + \left( \frac{U_{nc+1-j}}{V_j^s} \right)^2 - 2 \left( \frac{D_{j+1}^s}{D_j^s} \right)^2 \left( \frac{V_{j+1}^s}{V_j^s} \right)^2 \right) + \frac{150\mu}{\rho V_j^s D_j^s} \right) + \right. \\ \left. + a_0 \left( 1 - \left( \frac{D_c}{D_j^s} \right)^2 \left( \frac{U_{nc+1-j}}{V_j^s} \right) \right)^2 - \left( 1,6 - 0,3 \left( \frac{D_c}{D_j^s} \right)^2 \right) \left( \frac{U_{nc+1-j}}{V_j^s} \right)^2 \right] \quad (15)$$

$$\text{Sendo } A = 1 \text{ e } a_0 = 1,8 - \left( \frac{U_{nc+1-j} D_c^2}{V_j^s (D_j^s)^2} \right)$$

Finalmente este grupo de equa es apresentado   relativo às perda de carga do fluido que passa no último tubo absorvedor. Mais uma vez, na figura 5 podemos ver o caminho tomado pelo fluido havendo assim uma melhor compreensão relativamente às perdas de carga localizadas a que o fluido está sujeito.

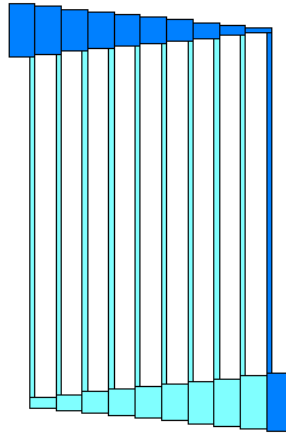


Figura 5 – Caminho percorrido pela corrente de fluido que passa no último tubo.

$$\Delta p_{nc} = \Delta p_{nc}^{linha} + \Delta p_{nc}^{localizada} \quad (16)$$

$$\Delta p_{nc}^{linha} = 32\mu \left( \sum_{j=1}^{nc} \frac{LV_j^e}{(D_j^e)^2} + \frac{L_c U_{nc}}{D_c^2} + \frac{LV_1^s}{(D_1^s)^2} \right) \quad (17)$$

Para a perda de carga localizada do fluido neste último caso, dividi-a também em três componentes, como se pode constatar da equa o (18). Uma primeira relativa   divergência do caudal no canal de entrada do 1  tubo ao 9  tubo, uma segunda relativa   mudança de direc o do caudal de 90  para a última saída do canal de entrada e uma terceira relativa   convergência do caudal do canal se saída com o 10  tubo.

$$\Delta p_{nc}^{localizada} = \Delta p_{nc}^{loc,div} + \Delta p_{nc}^{loc,90^\circ} + \Delta p_{nc}^{loc,conv} \quad (18)$$

$$\Delta p_{nc}^{loc,div} = \frac{1}{2} \rho \sum_{j=1}^{nc-1} (V_j^e)^2 \left( 3 \left( \tau_{st} \left( \frac{U_j D_c^2}{V_j^e (D_j^e)^2} \right)^2 \right) + \frac{33\mu}{\rho V_j^e D_j^e} \right) \quad (19)$$

Sendo  $\tau_{st} = 0,4$

$$\Delta p_{nc}^{loc,90^\circ} = \frac{1}{2} \rho (V_{nc}^e)^2 C_1 A^{90^\circ} \zeta_{local} \quad (20)$$

Sendo  $C_1 = 1$ ,  $A^{90^\circ} = 1,2$  e  $\zeta_{local} = 0,99$

$$\Delta p_{nc}^{loc,conv} = \frac{1}{2} \rho (V_1^s)^2 \left( 2 \left( A \left( 1 + \left( \frac{U_{nc}}{V_1^s} \right)^2 - 2 \left( \frac{D_2^s}{D_1^s} \right)^2 \left( \frac{V_2^s}{V_1^s} \right)^2 \right) + \frac{150\mu}{\rho V_1^s D_1^s} \right) \right) \quad (21)$$

Sendo  $A = 1$

Para completar o modelo de cáculo foi necessário definir mais algumas rela es entre os parâmetros em jogo. A rela o entre os diferentes diâmetros do canal de entrada é-nos dada por:

$$D_i^e = D_{nc}^e + (nc - i) \frac{D_1^e - D_{nc}^e}{nc - 1} \quad \text{para } i=2 \text{ até } nc-1 \quad (22)$$

A rela o entre os diâmetros do canal de entrada e os diâmetros do canal de saída equivalentes vem:

$$D_i^s = D_i^e + D_w \quad \text{para } i=1 \text{ até } nc \quad (23)$$



Para finalizar o modelo são faltam os balanços de massa:

$$U_i D_c^2 = V_i^e (D_i^e)^2 - V_{i+1}^e (D_{i+1}^e)^2 \quad \text{para } i=1 \text{ até } nc-1 \quad (24)$$

$$V_{nc+1-i}^s (D_{nc+1-i}^s)^2 = U_i D_c^2 + V_{nc+2-i}^s (D_{nc+2-i}^s)^2 \quad \text{para } i=2 \text{ até } nc \quad (25)$$

$$V_{nc}^e (D_{nc}^e)^2 = U_{nc} D_c^2 \quad (26)$$

$$V_{nc}^s (D_{nc}^s)^2 = U_1 D_c^2 \quad (27)$$

A geometria dos canais de entrada e de saída foi otimizada para uma variação mínima da velocidade nos tubos absorvedores, através do desvio padrão relativo médio:

$$\Delta U = \frac{1}{U_i} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nc} (U_i - \bar{U}_i)^2}{nc - 1}} \quad (28)$$

Sendo  $\bar{U}_i$  a velocidade média nos tubos. Quanto menor for a variação de velocidade entre os tubos, significa que melhor   distribuição do fluido.

O modelo de cálculo construído e já apresentado em cima ignorou as variações de temperatura do fluido que circula no interior da rede de canais do colector, admitindo assim um escoamento isotérmico. É ainda pertinente referir que foram impostos alguns parâmetros para que fosse possível obter uma solução coerente com o colector estudado. Esses parâmetros são mostrados na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros impostos

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
$nc$	10	-
$D_{nc}^e$	0,007	M
$L$	0,115	M
$D_c$	0,007	M
$L_c$	1,78	M
$\dot{m}$	0,04	Kg/s
Temperatura média	50	�C
Pressão média	101325	Pascal

Há apenas que fazer um parêntesis relativamente ao diâmetro mínimo ( $D_{nc}^e$ ) imposto para o canal de entrada. Inicialmente foi imposto um valor para o diâmetro máximo do canal de entrada igual ao valor do seu diâmetro no colector não-otimizado, mas depois de obtida uma 1ª solução, verificou-se que o diâmetro mínimo era inferior ao diâmetro dos tubos absorvedores, o que em termos construtivos não é uma opção muito viável. Foi decidido então fixar alternativamente um diâmetro mínimo para o canal de entrada igual ao diâmetro dos tubos absorvedores. É também importante referir que antes de se ter chegada a uma solução final houve a necessidade de se proceder de um modo iterativo para a definição de alguns valores. Salientando assim que o colector estudado tinha um diâmetro de 20 mm nos canais de entrada e de saída, mas esse valor teve de ser ajustado para 17,3 mm para que fosse coerente a comparação entre o colector não-otimizado e a solução para o colector otimizado.

A optimização no EES foi feita para uma minimização de  $\Delta U$  em função de  $D_w$  e de  $D_1^e$  utilizando o método de optimização – “direct search method”. A figura 6 ilustra-nos a solução obtida com os respectivos canais de entrada e de saída optimizados para a distribuição. O canal de entrada é cónico e têm um diâmetro máximo de 17,3 mm. O diâmetro mínimo foi imposto em 7 mm. Quanto ao canal de saída o modelo calcula o extra espaço  $D_w$  face ao canal de entrada. Foi obtido um valor de 0,6 mm.

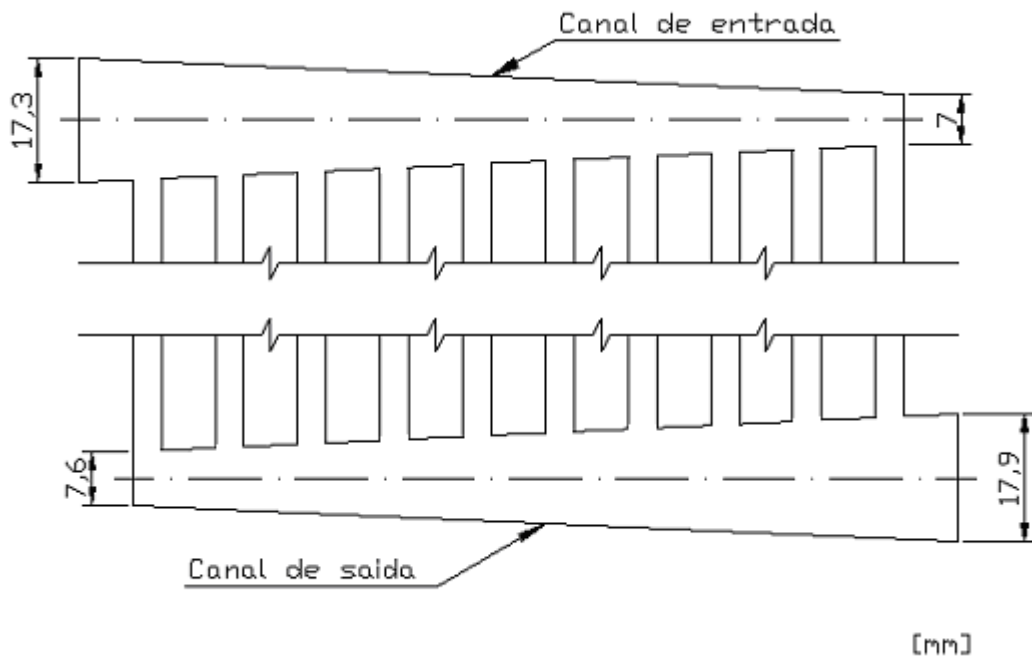


Figura 6 – Dimensões dos canais de entrada e de saída optimizadas.

Como foi referido no início do capítulo será apresentada a verificação do regime de escoamento admitido inicialmente. A tabela 2 mostra-nos o número de Reynolds calculado, para cada troço e tubo do colector, através dos dados obtidos no EES.

Tabela 2 – Valores de Reynolds para cada troço e tubo da rede de canais do colector.

<b>Canal de entrada</b>		<b>Tubos absorvedores</b>		<b>Canal de saída</b>	
<b>Troço <i>i</i></b>	<b>Reynolds</b>	<b>Tubo <i>i</i></b>	<b>Reynolds</b>	<b>Troço <i>i</i></b>	<b>Reynolds</b>
1	5384	1	864	1	5213
2	5390	2	893	2	4759
3	5383	3	1069	3	4412
4	5289	4	1228	4	4032
5	5091	5	1350	5	3602
6	4773	6	1431	6	3118
7	4338	7	1474	7	2580
8	3760	8	1498	8	2008
9	3002	9	1554	9	1412
10	1937	10	1937	10	800

Se analisarmos a tabela 2 verificamos que nos canais de entrada e de saída há mais zonas em regime transitório e turbulento, mas nos tubos absorvedores estamos sempre em regime laminar. Como aproximadamente 90% do caminho percorrido pelo fluido é nos tubos absorvedores, quando assumimos que o escoamento no colector é em regime laminar não estamos a cometer uma grande imprecisão.

Como a figura 7 apresenta, os valores de Reynolds da tabela 2 encontram-se todos dentro da faixa amarela representada. Pode-se então reforçar que o regime de escoamento predominante é o laminar. Apesar de alguns valores de Reynolds serem maiores do que 2300, segundo White[12] entre os valores de 2000 e 4000 para o número de Reynolds, correspondente à faixa de escoamento transitório, não existem valores confiáveis para o factor de atrito  $f$ . Restando assim um escoamento ligeiramente turbulento apenas na entrada e na saída do colector solar.

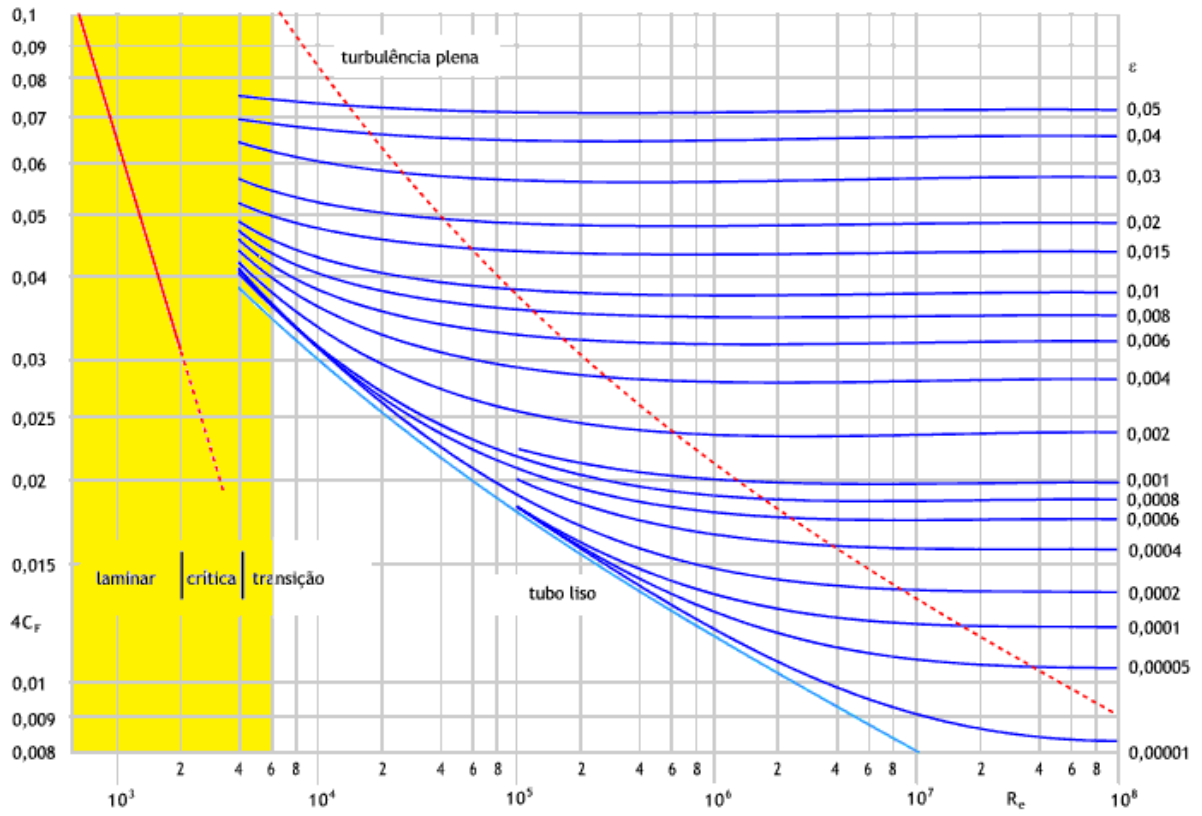


Figura 7 – Diagrama de Moody

## Capítulo 4

### Simulação do escoamento no colector solar

Para validar os resultados obtidos através do programa de cálculo implementado no EES foi realizada uma simulação do escoamento utilizando o software de dinâmica de fluidos computacional (CFD) Fluent 6.3.26. Algumas das etapas mais importantes na simulação do escoamento são descritas de seguida:

1. Um domínio computacional é definido, e uma malha (também chamada de grelha) é gerada. O domínio é dividido em pequenos elementos chamados células. Para domínios tridimensionais as células são volumes. Pode-se pensar em cada célula como um pequeno volume de controle em que versões discretizadas das equações da conservação da massa e da quantidade de movimento linear são solucionadas. A qualidade de uma solução de dinâmica de fluidos computacional é altamente dependente da qualidade da malha. Portanto é necessário verificar se a malha é de elevada qualidade antes de se avançar para os próximos passos.
2. O tipo de fluido é especificado assim como as suas respectivas propriedades.
3. Condições de fronteira são definidas em cada face do domínio.
4. Valores de partida para todo o campo de variáveis do escoamento são especificados para cada célula. Estes são as condições iniciais que podem ou não estar correctas, mas são necessárias como ponto de partida, para que o processo de iteração possa avançar.
5. Começando com os valores iniciais, formas discretizadas das equações da conservação da massa e da quantidade de movimento linear são solucionadas iterativamente. Pondo todos os termos das equações de um lado, a solução será “exacta” quando a soma desses termos, definida como resíduo, for zero para cada célula do domínio. Contudo, numa solução de dinâmica de fluidos computacional os resíduos nunca são zero, mas o seu valor diminui com o prosseguimento das iterações. Um resíduo pode ser visto como uma medida de quanto é que a solução de uma equação se desvia da solução “exacta”. A evolução gráfica da média dos resíduos de cada equação ajuda a determinar quando é que a solução converge.

Com o objectivo de comparar o escoamento entre o colector solar optimizado e o colector solar não-optimizado também uma segunda malha foi gerada e uma simulação efectuada para o colector não-optimizado. A malha era idêntica á malha gerada para o colector optimizado, nomeadamente no que diz respeito ao tipo e número de células, assim como todos os parâmetros definidos na simulação.

### 4.1. Geração da malha

O primeiro passo, e indiscutivelmente o mais importante, numa simulação de dinâmica dos fluidos computacional é a geração da malha que define as células em que as variáveis do escoamento são calculadas. Determinada a geometria óptima do canal de entrada e do canal de saída do colector solar através do EES foi então possível gerar uma malha com o software Gambit 2.3.16. A figura 8 representa um excerto da malha gerada. O troço horizontal pertence ao canal de entrada e o troço vertical pertence ao tubo absorvedor.

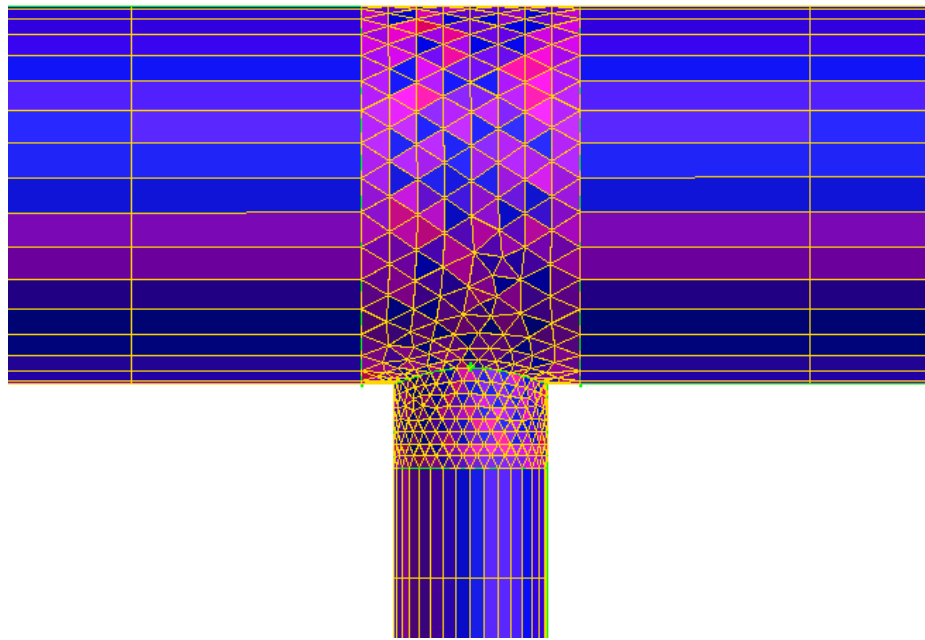


Figura 8 – Excerto da malha gerada no Gambit.

Como se pode ver na figura 8, foram utilizados dois tipos de malhas. Para isso o domínio foi previamente dividido em várias partes. Nas intersecções entre o canal de entrada e de saída com os tubos absorvedores foi utilizada uma malha não-estruturada (hibrida) composta por tetraedros e pentaedros, ou seja, células com 4 e 5 faces respectivamente. A figura 9 faz-nos ter uma melhor percepção das células geradas na zona das referidas intersecções.

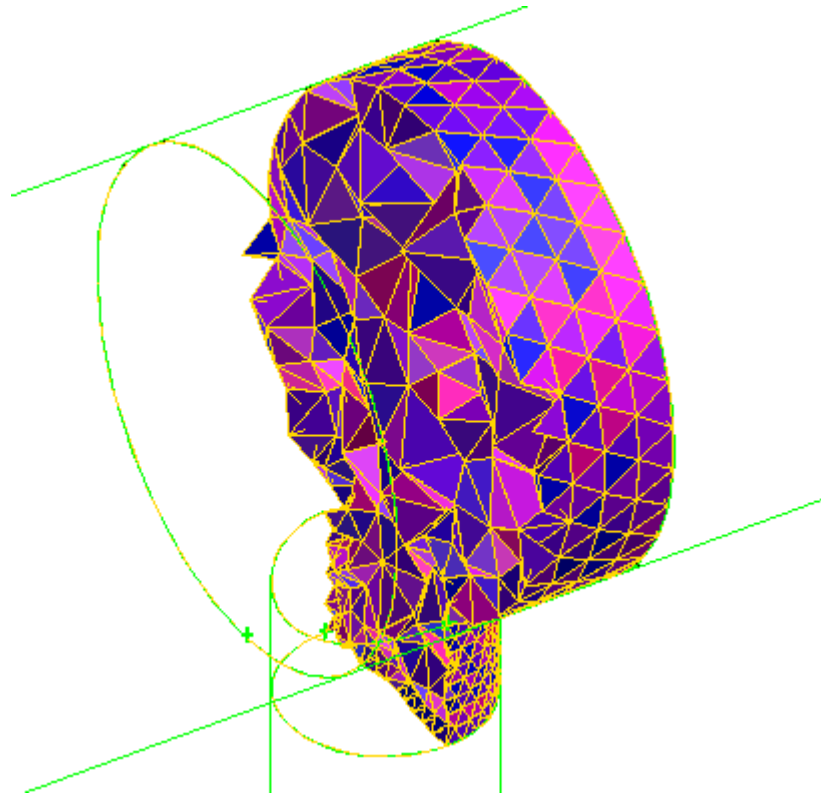


Figura 9 – Elementos gerados na zona de intersecção.

Nas restantes partes do domínio foi utilizada uma malha estruturada constituída por hexaedros. Novamente, a figura 10 ajuda-nos a ter uma melhor percepção das células geradas para os tubos absorvedores e para as restantes zonas do canal de entrada e de saída. Este tipo de malha gerada nos tubos tem uma densidade de aproximadamente  $2,9 \text{ células/mm}^2$ . No final foi obtida uma malha com 547180 células.

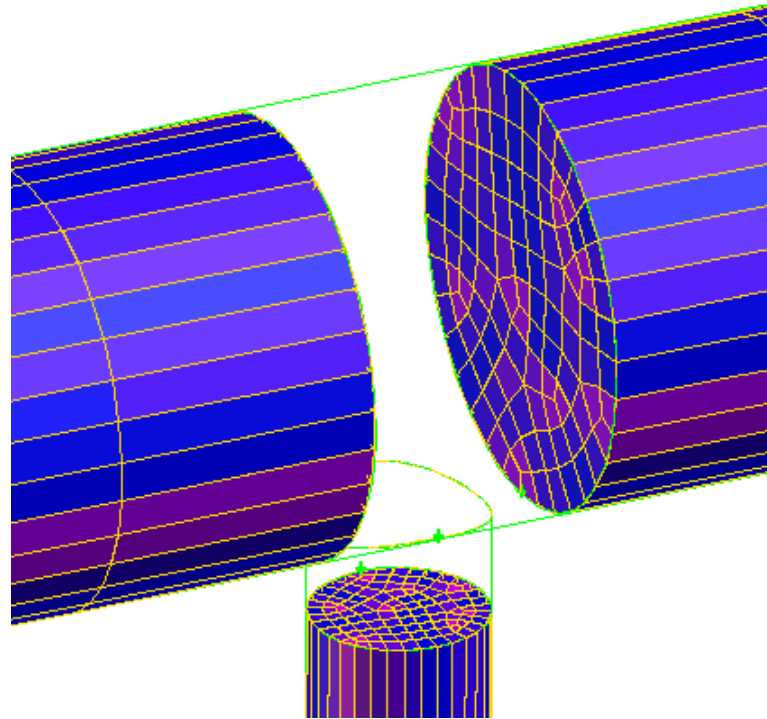


Figura 10 – Elementos gerados nos tubos absorvedores e no canal de entrada e de saída.

A qualidade da malha gerada foi avaliada pelo parâmetro “EquiSize Skew”. O “EquiSize Skew” ( $Q_{EVS}$ ) é uma medida da inclinação do elemento de volume (célula) que se define como:

$$Q_{EVS} = \frac{S_{eq} - S}{S_{eq}} \quad (29)$$

onde  $S$  é o volume do elemento da malha e  $S_{eq}$  é o máximo volume de um elemento equilátero de raio circunscrito idêntico ao do elemento de volume da malha. Por definição,

$$0 \leq Q_{EVS} \leq 1 \quad (30)$$

onde  $Q_{EVS} = 0$  significa um elemento equilátero e  $Q_{EVS} = 1$  um elemento completamente degenerado. Em geral uma malha de elevada qualidade tem um “EquiSize Skew” médio de 0,4[13]. Uma análise detalhada de ambas as malhas geradas (para o modelo do colector não-otimizado e para o modelo do colector otimizado) encontra-se nas tabelas B.1 e B.2 do anexo B.



Para concluir o trabalho realizado no Gambit é necessário definir as zonas de fronteira e que tipo de fronteira. Foi então imposta uma entrada de caudal na face de entrada do canal de entrada, uma pressão de saída na face de saída do canal de saída e todas as outras superfícies foram consideradas paredes, excepto as faces interiores comuns a cada par de volumes, que foram consideradas como neutras, ou seja, não provocam qualquer alteração no escoamento.

Por último, é importante referir que antes de ter optado por este tipo de configuração da malha outros tipos foram testados, tais como malhas completamente híbridas, híbridas em todo o canal de entrada e de saída e células hexaédricas nos tubos absorvedores, mas a que mostrou melhores resultados, ou seja, um melhor compromisso entre a quantidade de células e a qualidade de cada célula, foi a malha adoptada.

## *4.2. Simulação no Fluent*

Depois de gerada a malha e exportada para o Fluent prosseguiu-se com definição de alguns parâmetros que iriam permitir obter uma solução para o escoamento no interior do colector solar. Os parâmetros definidos com maior relevância serão mencionados nos parágrafos seguintes.

Nesta simulação a transferência de calor dos tubos absorvedores para o fluido foi levada em consideração. Portanto foi necessário impor mais uma equação a ser solucionada além das equações da conservação da energia e da quantidade de movimento linear. Essa equação é a equação da energia.

O fluido escolhido para circular dentro do colector solar foi a água. Para cada propriedade foi dado um conjunto de valores em função da temperatura o que permitiu ao software efectuar as interpolações necessárias para toda a gama de temperaturas em jogo.

Relativamente às condições de fronteira, na face de entrada foi imposto um caudal de entrada, na face de saída foi imposta uma pressão de saída, em todas as paredes foi imposta a condição de não-escorregamento e fluxo de calor nulo, excepto nas paredes dos tubos absorvedores, que foi imposto um fluxo constante de calor (mais á frente será explicado a imposição do fluxo de calor nos tubos absorvedores). Na tabela 3 encontra-se sintetizada a informação relativa ás condições de fronteira com os respectivos valores numéricos.

Tabela 3 – Valores utilizados para a definição das condições de fronteira.

<i>Fronteira</i>	<i>Condição</i>
Face de entrada	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Caudal de água de 0.04 Kg/s a 45°C</li> <li>➤ Direcção perpendicular á fronteira</li> </ul>
Face de saída	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Pressão relativa de 0 Pa</li> <li>➤ Direcção perpendicular á fronteira</li> </ul>
Tubos absorvedores	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Condição de não-escorregamento nas paredes</li> <li>➤ Fluxo de calor de 4000 W/m<sup>2</sup></li> </ul>
Canal de entrada	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Condição de não-escorregamento nas paredes</li> <li>➤ Paredes adiabáticas</li> </ul>
Canal de saída	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Condição de não-escorregamento nas paredes</li> <li>➤ Paredes adiabáticas</li> </ul>

Devido à complexidade inerente na modelação da placa absorvedora de um colector solar, foi decido calcular analiticamente o valor do calor transferido dos tubos absorvedores para o fluido e impô-lo na parede dos mesmos. Então, admitindo que a radiação solar absorvida na superfície inclinada do colector é de 750 W/m<sup>2</sup> e a área colectora é de 2 m<sup>2</sup>, temos que o colector recebe uma potência de 1500 W. Sabendo que a área da superfície dos tubos absorvedores tem aproximadamente 0,375 m<sup>2</sup>, dividindo a potência por esta área temos os 4000 W/m<sup>2</sup>, que é como se a radiação solar estive a incidir de igual forma directamente nos tubos absorvedores.

Como já foi referido no inicio do capitulo também valores de partida tiveram que ser definidos para dar inicio ao processo iterativo assim como valores para os resíduos médios com a função de parar o processo iterativo. A tabela 4 apresenta-nos os valores definidos para as condições iniciais; a tabela 5 apresenta-nos os valores definidos para os resíduos médios mínimos.

Tabela 4 – Valores iniciais para o campo de variáveis do escoamento

<i>Variável</i>	<i>Condição inicial</i>
P (pressão)	0 Pa
Velocidade-x	0 m/s
Velocidade-y	0 m/s
Velocidade-z	0 m/s
T (temperatura)	318,16 K

Tabela 5 – Resíduos médios mínimos para cada equação.

<i>Equação</i>	<i>Critério</i>
Conservação da massa	1E-3
Quantidade movimento linear em x	1E-4
Quantidade movimento linear em y	1E-4
Quantidade movimento linear em z	1E-4
Energia	1E-7

No anexo C encontra-se a evolução gráfica dos resíduos médios, relativos a cada equação a ser solucionada, obtida na simulação do colector solar otimizado.

## Capítulo 5

### Resultados

Nesta secção serão então apresentados os resultados obtidos mais relevantes. Será feita uma comparação entre a distribuição de velocidades obtida no EES e a distribuição obtida no Fluent. De maneira a quantificar a dispersão entre as duas soluções encontradas, utilizei o erro relativo médio entre os dez tubos absorvedores, que é definido pela equação (31), onde  $U$  significa a velocidade média no tubo, o índice CFD é relativo aos dados obtidos no software Fluent e o índice EES relativo aos dados obtidos no software EES.

$$\bar{\varepsilon}_{rel} = \frac{1}{nc} \sum_{i=1}^{nc} \frac{\sqrt{(U_i^{CFD} - U_i^{EES})^2}}{U_i^{CFD}} \quad (31)$$

Uma análise da independência da solução relativamente à malha utilizada no estudo da distribuição do escoamento no colector solar otimizado foi feita. Será também analisada a optimização da distribuição de velocidades do escoamento no colector solar com os resultados obtidos no modelo numérico do Fluent. Para poder quantificar a diferença entre os dados foi utilizada a equação (28), já anteriormente definida no programa de cálculo implementado no EES, como desvio padrão relativo médio. Essa expressão dá-nos uma ideia de quanto é que a distribuição em causa se desvia da situação ideal (distribuição uniforme). Para reforçar as análises elaboradas foi também levado em conta a perda de carga total para cada caso em estudo. Por último também uma análise foi feita relativamente às causas da não-uniformidade da distribuição e aos factores que influenciaram a melhoria na uniformidade da distribuição quando se procedeu à optimização dos canais de entrada e de saída do colector solar.

### 5.1. Independência da solução da malha utilizada

Para verificar a independência da solução obtida relativamente á malha utilizada foi gerada uma malha com menor número de elementos de volume. A independência da malha deve ser verificada com uma malha de maior número de elementos, mas o software disponibilizado não conseguia realizar simulações com malhas de muito maior número de elementos, do que a utilizada para o estudo da distribuição de velocidades no colector com geometria otimizada. A independência da solução foi verificada com base na distribuição de velocidades, como apresenta a figura 11.

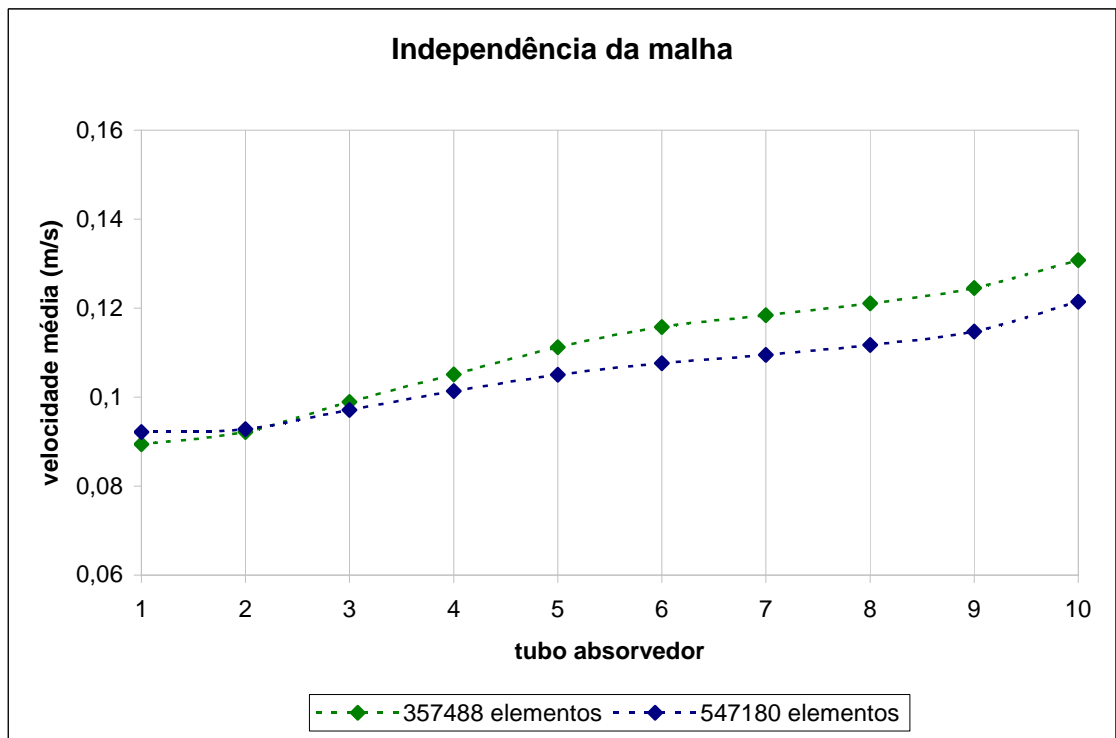


Figura 11 – Distribuições das velocidades médias em cada tubo absorvedor obtidas com uma malha de 357488 elementos e com uma malha de 547180 elementos.

Utilizando a equação (31), vimos que as distribuições de velocidades obtidas em ambos os casos revelam apenas um erro médio de 5,5%. Analisando a figura 11 e tendo em conta que, segundo Cençel[14], para se verificar uma solução independente da malha, os parâmetros avaliados não duas situações têm que ter um erro menor que 10%, podemos então afirmar que a solução obtida com a malha de 547180 elementos é independente.

## 5.2. Validação da solução obtida no EES com a solução obtida no Fluent

Com o objectivo de validar o programa de cálculo, baseado nas perdas de carga, implementado no EES, foi realizada uma simulação no Fluent. Na figura 12 são apresentadas as velocidades médias em cada tubo absorvedor do colector solar com a geometria otimizada, obtidas através do EES e através do Fluent.

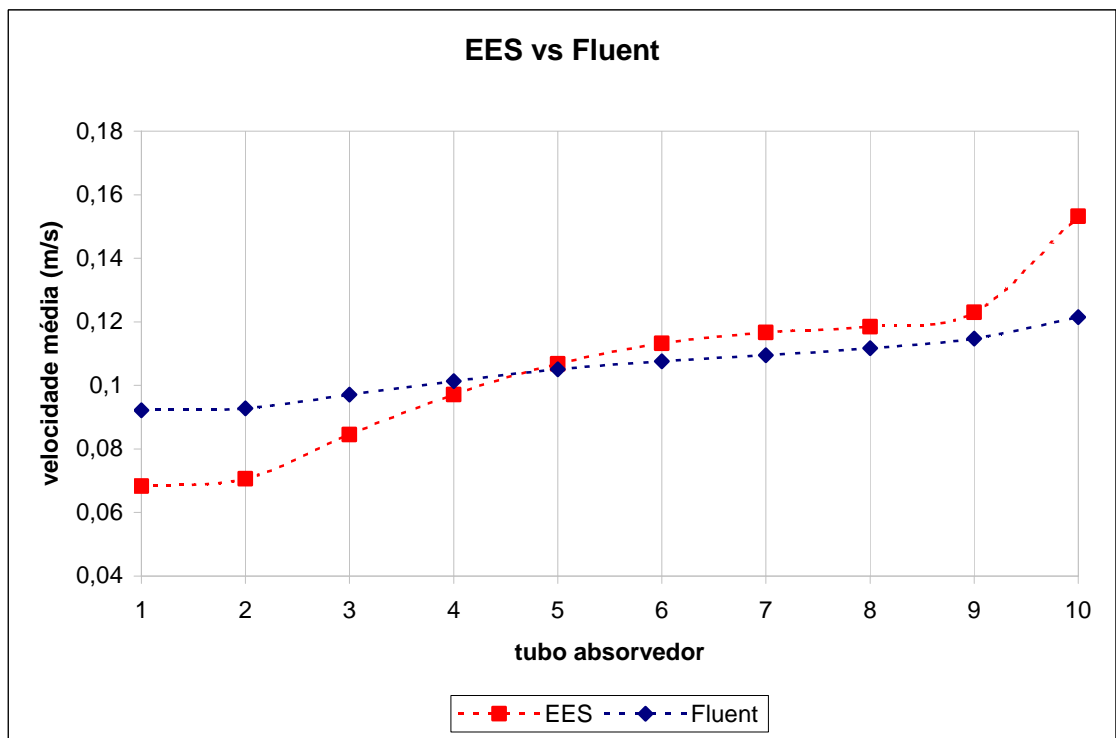


Figura 12 – Distribuições das velocidades médias nos tubos absorvedores obtidas através do EES e do Fluent para o colector solar otimizado.

Como se pode constatar da figura 12 as duas distribuições obtidas apresentam uma razoável concordância tendo um erro médio de 12,0%. Apenas no 1º, 2º e último tubo a diferença entre as velocidades é mais acentuada. A perda de carga, entre a entrada e a saída do colector, calculada através do modelo no EES foi de 166,5Pa e na simulação foi de 170,3Pa. Tendo em conta os valores da perda de carga, estes apresentam apenas um erro de 2,2%. Podemos então afirmar que o programa de cálculo implementado no EES é adequado para caracterizar o escoamento no colector solar com uma precisão aceitável para o objectivo do trabalho. Numa situação mais exigente um erro de 12,0% na distribuição das velocidades pode não ser plausível.

### 5.3. Influência da variação da temperatura na distribuição de velocidades do colector optimizado.

Com o intuito de avaliar se o facto de ter considerado a variação da temperatura do fluido ao longo do colector teria uma grande influência na distribuição das velocidades, um modelo isotérmico também foi simulado no Fluent. A figura 13 apresenta-nos a distribuição das velocidades obtidas através do modelo isotérmico e do modelo não-isotérmico considerado em todas as outras análises.

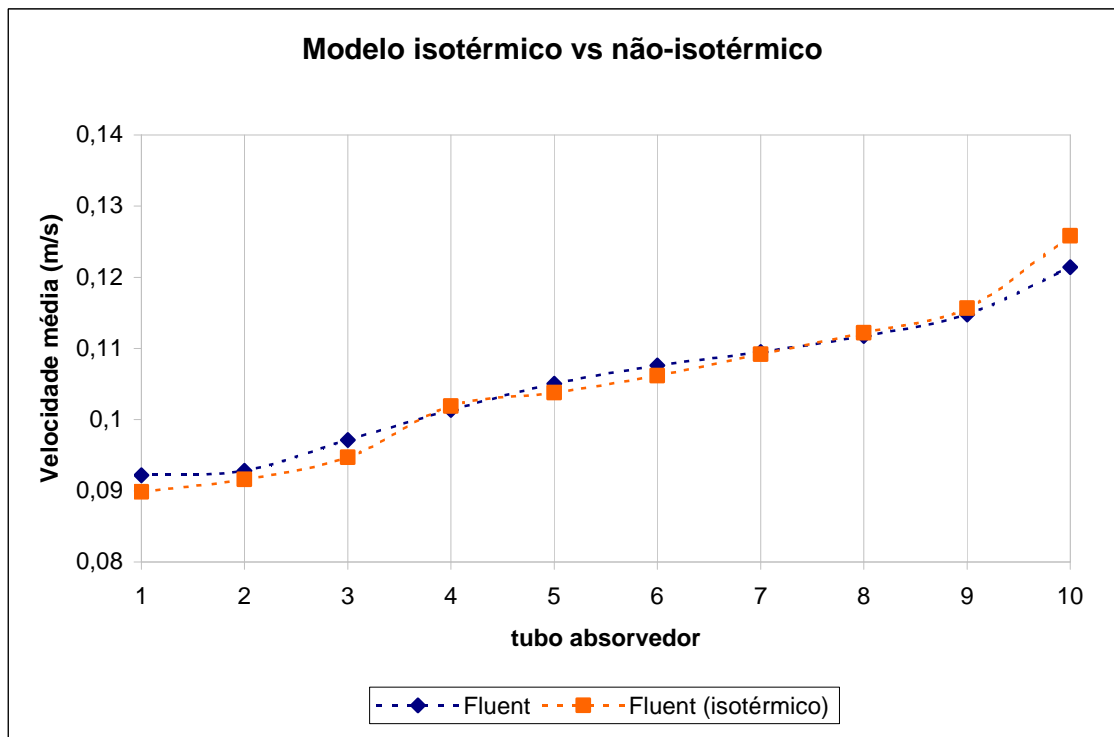


Figura 13 – Distribuições das velocidades médias nos tubos absorvedores obtidas através do Fluent para um modelo isotérmico e para o modelo com transferência de calor.

A comparação das distribuições obtidas através do modelo isotérmico e do modelo não-isotérmico é bastante reveladora. Vê-se claramente que para um fluxo de calor imposto de 4000 W/m<sup>2</sup> nas paredes dos tubos absorvedores a diferença entre as distribuições é muito pequena. A distribuição obtida através do modelo isotérmico tem um erro médio de apenas 2,1% relativamente á distribuição do modelo que leva em consideração a variação da temperatura. A diferença de temperaturas do fluido entre a entrada e a saída do colector foi de aproximadamente 10°C. Com esta diferença de temperaturas o valor das propriedades do fluido não sofre uma alteração significativa, não alterando assim significativamente a distribuição.

### 5.4. Análise do efeito da optimização na distribuição das velocidades

Com o objectivo de explorar quais as alterações provocadas na distribuição de velocidades quando se procede à optimização dos canais de entrada e de saída do colector um modelo para o colector solar não-optimizado foi simulado. Na figura 14 são apresentadas as distribuições obtidas através Fluent, para o colector solar com a geometria optimizada e não-optimizada.

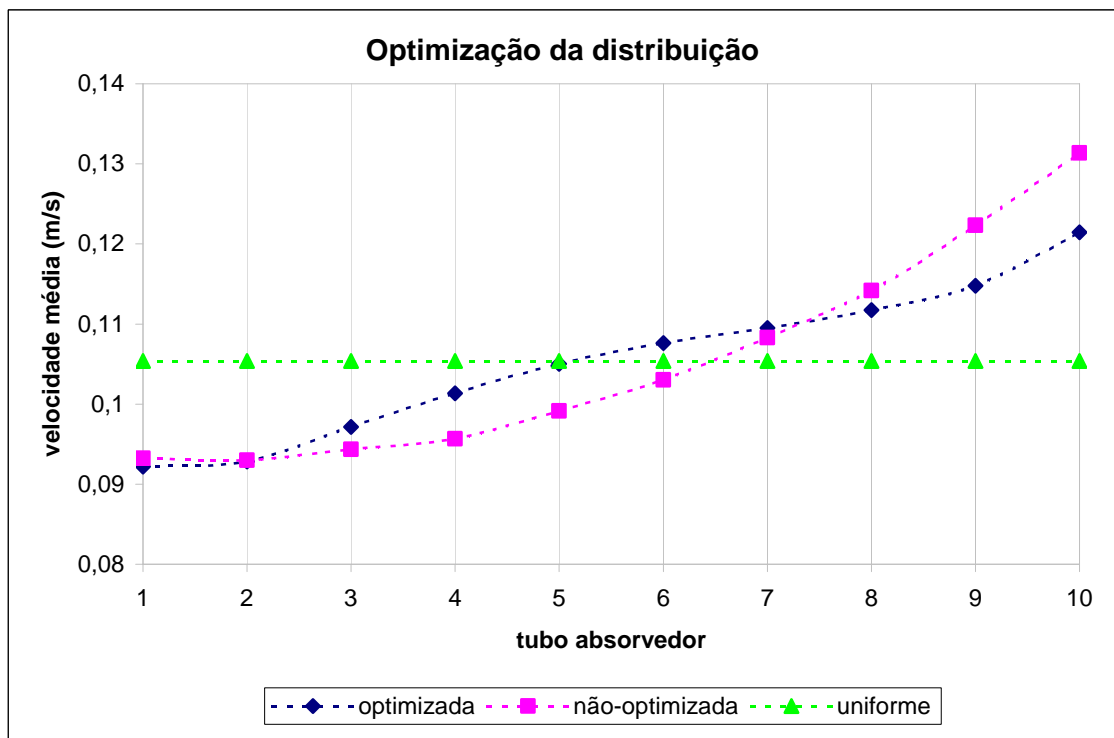


Figura 14 – Distribuição das velocidades médias nos tubos absorvedores do colector optimizado e não-optimizado obtidas através do Fluent. A distribuição uniforme também é apresentada.

A distribuição no colector com a geometria optimizada apresentou um  $\Delta U$  de 0,0909 enquanto que a distribuição no colector com a geometria não-optimizada apresentou um  $\Delta U$  de 0,1268. Uma distribuição uniforme apresentaria um  $\Delta U$  nulo. Portanto, verifica-se que ao fazer a optimização do canal de entrada e de saída há uma melhoria de aproximadamente 28,3% na uniformidade de distribuição do fluido. Em contrapartida a perda de carga no colector não-optimizado foi de 132,4 Pa face a uma perda de carga de 170,3 no colector optimizado o que é equivalente a um aumento de 28,6% na perda de carga.



### 5.5. Discussão dos resultados obtidos devido à optimização da distribuição do caudal

Segundo Weitbrecht[7] os coeficientes de perda de carga localizada para a convergência de duas correntes de fluido são muito maiores do que os coeficientes de perda de carga localizada para a divergência de uma corrente de fluido. Isto acontece devido aos efeitos de separação que ocorrem apenas nas intersecções entre os tubos absorvedores e o canal de saída. A figura 15 mostra-nos os contornos da velocidade obtidos através da simulação realizada no Fluent para o colector com a geometria não-optimizada, ajudando-nos assim a perceber a diferença existente entre o comportamento do escoamento no canal de entrada e no canal de saída.

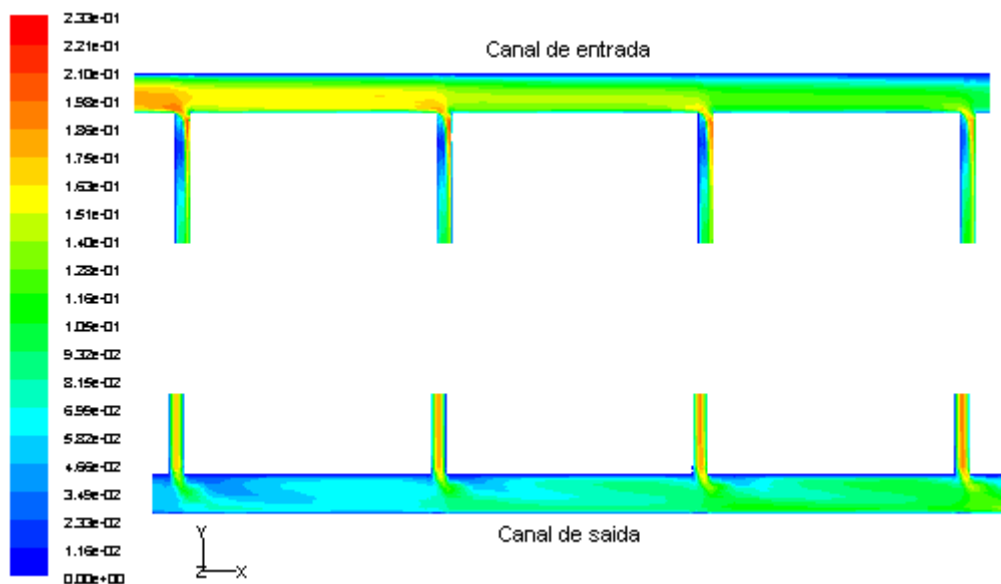


Figura 15 – Contornos da velocidade (m/s) nas intersecções, do 4º ao 7º tubo absorvedor, com o canal de entrada e com canal de saída do colector solar não-optimizado.

Esta diferença entre os coeficientes é o principal responsável pela não-uniformidade na distribuição do caudal. Para entender porque é que este tipo de distribuição acontece é necessário pensar nos diferentes caminhos que uma partícula de fluido poderia percorrer ao longo da rede de canais do colector. Seguindo uma partícula de fluido que se move através do primeiro tubo absorvedor verificamos que ela passa em quase todas as zonas de maior coeficiente de perda de carga localizada. Em contraste, uma partícula de fluido que se mova através do último tubo passa em apenas uma zona de elevado coeficiente de perda de carga localizada no canal de saída. Isto significa que a velocidade, e como consequência o caudal, deverá ser mais baixo no primeiro tubo e mais alta no último para que se obtenha a mesma perda de carga total qualquer que seja o caminho seguido pelo fluido.

Se analisarmos a variação dos parâmetros da expressão (32) que define a perda de carga total (perdas em linha mais perdas localizadas) entendemos facilmente o porquê da não-uniformidade na distribuição do caudal.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \left( \sum f \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \quad (32)$$

Como já foi referido anteriormente a corrente de fluido que passa pelo primeiro tubo absorvedor encontra muitas zonas de elevado  $\zeta$  o que faz com que  $v$  baixe, com a agravante do aumento de  $f$ . Por outro lado, para que se tenha a mesma  $\Delta p$  na corrente de fluido que passa no último tubo o sistema aumenta  $v$  porque o fluido encontra zonas com baixos valores de  $\zeta$  com a atenuante da diminuição de  $f$ . A figura 16 mostra-nos os contornos da pressão estática obtidos através da simulação realizada no Fluent para o colector com a geometria não-otimizada confirmando assim os argumentos apresentados nos paragrafos anteriores.

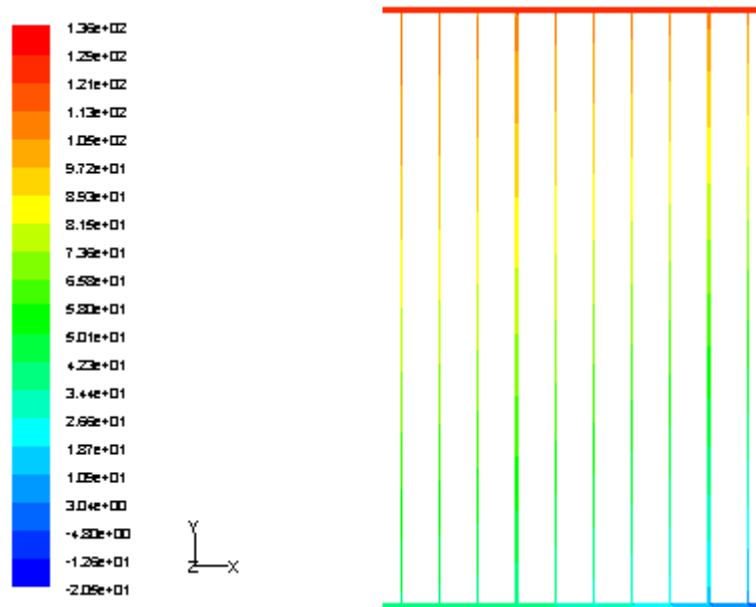


Figura 16 – Contornos da pressão estática (Pa) do fluido que circula no colector não-otimizado.

Vê-se claramente que no canal de entrada a perda de carga é muito baixa em contraste com a perda de carga no canal de saída devido aos elevados valores de coeficientes de perda de carga localizada. É também perceptível que a perda de carga no último tubo é maior do que no primeiro devido á maior velocidade do fluido.

É interessante agora perceber quais os factores que contribuíram para uma maior uniformidade na distribuição do caudal quando se procede à optimização da geometria dos canais de entrada e de saída do colector solar.

A optimização da geometria dos canais de entrada e de saída consiste na diminuição progressiva do diâmetro do canal. Logo, ao diminuirmos o diâmetro estamos a aumentar a velocidade. As figuras 17 e 18 mostram-nos o aumento da velocidade nas zonas do canal de entrada e do canal de saída onde esse aumento foi mais significativo, através mais uma vez dos contornos da velocidade obtidos através das simulações no Fluent.

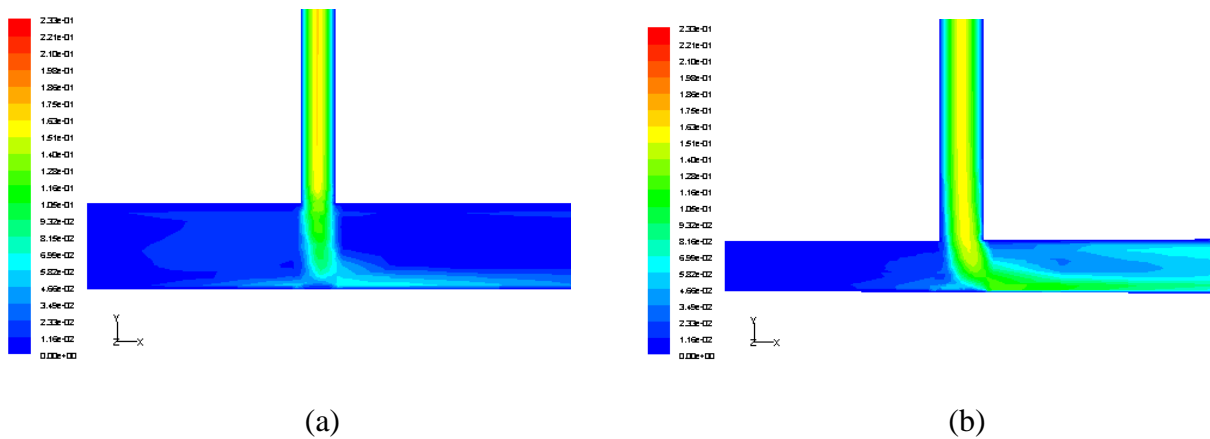


Figura 17 – Contornos da velocidade (m/s) na intersecção entre o canal de saída e o 1º tubo absorvedor no colector não-optimizado (a) e no optimizado (b).

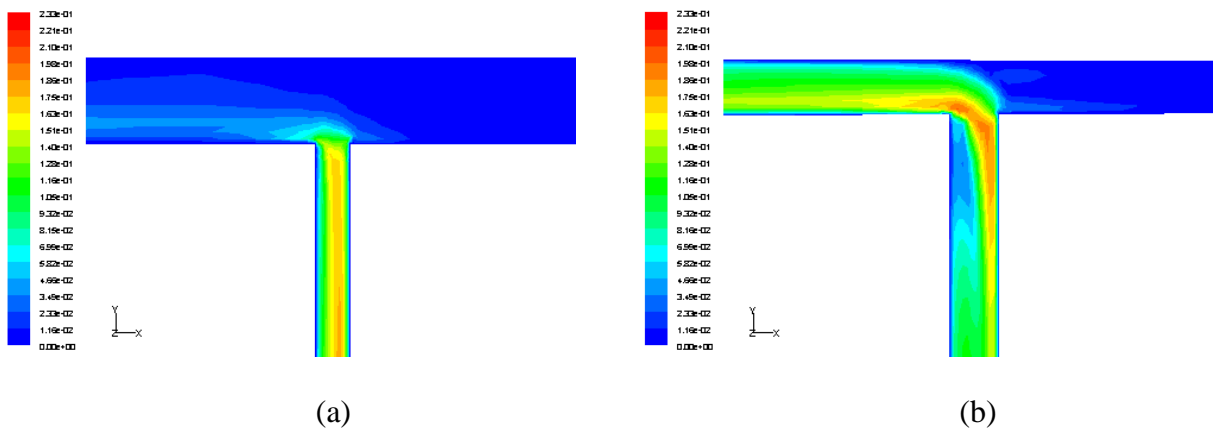


Figura 18 – Contornos da velocidade (m/s) na intersecção entre o canal de entrada e o último tubo absorvedor no colector não-optimizado (a) e no optimizado (b).

O aumento da velocidade provoca um aumento do número de Reynolds. Weitbrecht[7] mostrou que os coeficientes de perda de carga localizada ( $\zeta$ ) não só dependiam da razão entre o caudal do tubo ( $Q_t$ ) e o caudal do canal ( $Q_c$ ) como também dependiam fortemente do número de Reynolds. Essa dependência é ilustrada na figura 19.

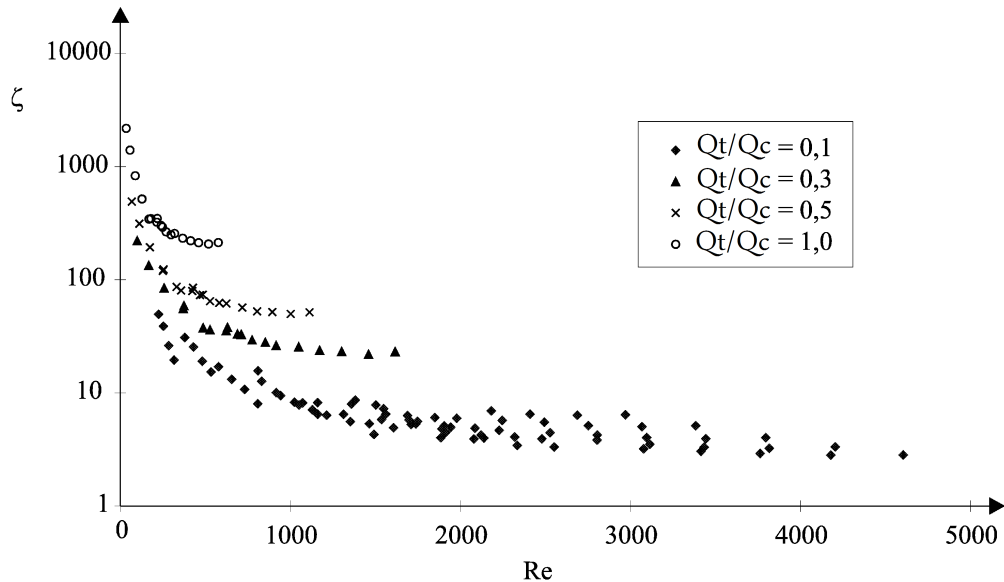


Figura 20 – Coeficiente de perda de carga localizada.

Como mostra a figura 19, ao aumentarmos o  $Re$  estamos a diminuir o coeficiente de perda de carga localizada. No entanto, se a diminuição fosse da mesma ordem no canal de entrada e no canal de saída não haveria nenhuma alteração na distribuição do caudal, mas apenas na perda de carga total. Porém nos últimos troços do canal de saída, estamos perante  $Re$  mais baixos do que nos últimos troços do canal de entrada. Ao analisarmos a figura vemos que a dependência de  $\zeta$  com  $Re$  é tanto mais acentuada quanto menor for  $Re$ .

Pode-se então concluir que a diferença entre os coeficientes de perda de carga localizada no canal de saída e no canal de entrada foi diminuída com a optimização da geometria dos respectivos canais aumentando assim a uniformidade na distribuição do caudal. A figura 20 demonstra claramente a menor diferença entre as perdas de carga nos canais de entrada e de saída.

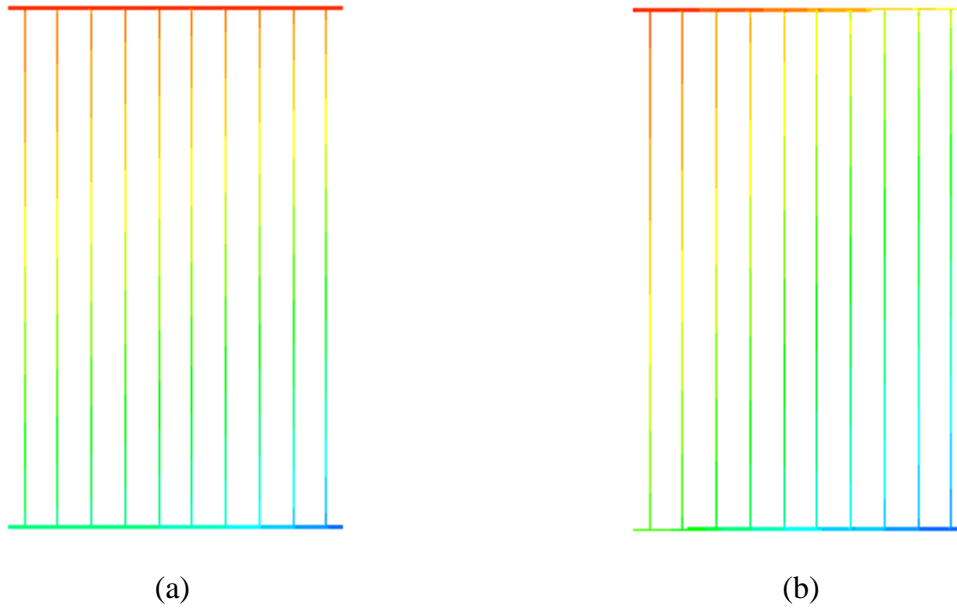


Figura 20 – Contornos da pressão estática do fluido que circula no colector não-otimizado (a) e no otimizado (b).

Relativamente ao aumento da perda de carga total quando se procede à optimização, se recorrermos novamente á análise dos parâmetros da expressão (32) vemos que o aumento de  $v$  e a diminuição de  $d$  tiveram um maior peso do que a diminuição de  $f$  e de  $\zeta$ .

## Capítulo 6

### Conclusões

Uma optimização da distribuição de fluido de um colector solar plano com configuração em Z foi efectuada. Para isso um programa de cálculo baseado em correlações para as perdas de carga em linha e localizadas foi desenvolvido com o objectivo de optimizar a geometria dos canais de entrada e saída do colector. Esse programa de cálculo foi implementado no software EES e obteve-se uma solução que nos forneceu as dimensões do colector e as respectivas velocidades do fluido que circula dentro do mesmo.

Seguidamente, com esses dados foi possível elaborar um modelo numérico no software Fluent e obter outra distribuição de fluido para validação do modelo desenvolvido no EES.

Obtidos os resultados dos dois modelos foi realizada uma comparação e concluído que o modelo implementado era adequado para descrever o escoamento no interior do colector, pois o mesmo mostrava um pequeno desvio relativamente ao modelo numérico de dinâmica de fluidos computacional.

Foi feito um estudo da independência da solução relativamente á malha utilizada e conclui-se que para a malha utilizada a solução era independente. Conclui-se também que o modelo de cálculo construído e implementado no EES era válido para a análise do escoamento dentro de uma gama de precisão aceitável para o objectivo do trabalho. Finalmente foi mostrado que a optimização dos canais de entrada e de saída do colector provoca um ganho de aproximadamente 28% na uniformidade da distribuição do fluido.

Também uma análise foi feita relativamente ás causas da não-uniformidade da distribuição e aos factores que influenciaram a melhoria na uniformidade da distribuição quando se procedeu à optimização dos canais de entrada e de saída do colector solar.

Como trabalho futuro seria interessante analisar até que ponto seria razoável perturbar o escoamento no canal de entrada para atenuar a diferença entre os coeficientes de perda de carga localizada no canal de saída e no canal de entrada.

## Capítulo 7

### Referências e bibliografia

- [1] Idelchik, I. E., Handbook of Hydraulic Resistance, 3<sup>rd</sup> edition, Jaico Publishing House, 2003.
- [2] Wang X. A. e Wu L. G. (1990) Analysis and performance of flat-plate solar collector arrays. *Solar Energy* 45(2), 71-78.
- [3] Shen, P. I., 1992. The effect of friction on flow distribution in dividing and combining flow manifolds. *ASME J. Fluids Eng.* 114, 121-123.
- [4] Jones G. F. e Lior N. (1994) Flow distribution in manifolded solar collectors with negligible buoyancy effects. *Solar Energy* 52(3), 289-300.
- [5] Gunnewiek, L. H., Brundrett, E., Hollands, K.G.T., 1996. Flow distribution in unglazed transpired plate solar air heaters of large area. *Solar Energy* 58(4-6), 227-237.
- [6] Gunnewiek, L. H., Brundrett, E., Hollands, K.G.T., 2002. Effect of wind on flow distribution in unglazed transpired plate collectors. *Solar Energy* 72(4), 317-325.
- [7] Weitbrecht, V., Lehmann, D. e Richter, A., Flow distribution in solar collectors with laminar flow conditions, *Solar energy*, 73 (6), 433-441, 2002.
- [8] Tonomura, O., Tanaka, S., Noda, M., Kano, M., Hasebe, S., & Hashimoto, I. 2004. CFD-based optimal design of manifold in plate-fin microdevices. *Chemical Engineering Journal*, 101, 397-402.
- [9] Delsman, E. R., Pierik, A., De Croon, M. H. J. M., Kramer, G. J., & Schouten, J. C. 2004. Microchannel plate geometry optimization for even flow distribution of high flow rates. *Chemical engineering Research and Design*, 82 (A2), 267-273.
- [10] Facão, Jorge e Gruss, Jean-Antoine, Flow distribution in a network of minichannels: simulation and experiment, *MicroFluids 2006*, Toulouse, 12-14 December (2006).

[11] Fan, J., Shah, L. J. e Furbo, S., Flow distribution in a solar collector panel with horizontal inclined absorber strips, Solar Energy 81, 1501-1511, 2007.

[12] White F. M., Mecânica dos Fluidos, 4ª edição, McGraw-Hill, 2002.

[13] GAMBIT 2.3.16 User's Guide.

[14] Yunus A. Cengel e John M. Cimbala, Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, McGraw-Hill, 2004.



## Anexo A - Localização dos coeficientes em Idelchik

Tabela A.1 – Localização dos coeficientes e das respectivas expressões retiradas de Idelchik[1]

<b>Perda de carga no 1<sup>o</sup> tubo absorvedor</b>			
<b>Expressão (n<sup>o</sup>)</b>	<b>Expressão (Idelchik)</b>	<b>Coefficientes</b>	<b>Localização</b>
$\Delta p_1^{loc,div}$ (6)	1 <sup>a</sup> equa�o da página 422	$k_1 = 1$	Tabela 7-7
		$A' = 1,1 - 0,7 \left( \frac{U_1 D_c^2}{V_1^e (D_1^e)^2} \right)$	Tabela 7-4
$\Delta p_1^{loc,90^\circ}$ (7)	–	$C_1 = 1$	Diagrama 6-7
		$A = 1,2$	Diagrama 6-7
		$\zeta_{local} = 0,99$	Diagrama 6-7
$\Delta p_1^{loc,conv}$ (8)	�ltima equa�o da página 421	$A = 1$	Tabela 7-1
		$a_0 = 1,8 - \left( \frac{U_{nc+1-j} D_c^2}{V_j^s (D_j^s)^2} \right)$	Tabela 7-6

<b>Perda de carga nos tubos absorvedores i=2 até nc-1</b>			
<b>Expressão (n<sup>o</sup>)</b>	<b>Expressão (Idelchik)</b>	<b>Coefficientes</b>	<b>Localização</b>
$\Delta p_i^{loc,div,ant}$ (12)	2 <sup>a</sup> equa�o da página 422	$\tau_{st} = 0,4$	Diagrama 7-20
$\Delta p_i^{loc,div}$ (13)	1 <sup>a</sup> equa�o da página 422	$k_1 = 1$	Tabela 7-7
		$A' = 1,1 - 0,7 \left( \frac{U_1 D_c^2}{V_1^e (D_1^e)^2} \right)$	Tabela 7-4
$\Delta p_i^{loc,conv}$ (14)	2 <sup>a</sup> equa�o da página 421	$A = 1$	Tabela 7-1
$\Delta p_i^{loc,conv,post}$ (15)	�ltima equa�o da página 421	$A = 1$	Tabela 7-1
		$a_0 = 1,8 - \left( \frac{U_{nc+1-j} D_c^2}{V_j^s (D_j^s)^2} \right)$	Tabela 7-6

<b>Perda de carga no último tubo absorvedor</b>			
<b>Expressão (n<sup>o</sup>)</b>	<b>Expressão (Idelchik)</b>	<b>Coefficientes</b>	<b>Localização</b>
$\Delta p_{nc}^{loc,div}$ (19)	2 <sup>a</sup> equa�o da página 422	$\tau_{st} = 0,4$	Diagrama 7-20
$\Delta p_{nc}^{loc,90^\circ}$ (20)	–	$C_1 = 1$	Diagrama 6-7
		$A = 1,2$	Diagrama 6-7
		$\zeta_{local} = 0,99$	Diagrama 6-7
$\Delta p_{nc}^{loc,conv}$ (21)	2 <sup>a</sup> equa�o da página 421	$A = 1$	Tabela 7-1

## *Anexo B - Qualidade das malhas geradas*

Tabela B.1 – Análise do “Equisize Skew” dos elementos de volume da malha utilizada para o modelo do colector solar não-otimizado fornecida pela Gambit

EQUISIZE SKEW			
Desde o valor	Até ao valor	Nº de elementos	Nº de elementos em %
0	0,1	123352	22,6
0,1	0,2	169021	30,97
0,2	0,3	117071	21,45
0,3	0,4	65044	11,92
0,4	0,5	48720	8,93
0,5	0,6	12650	2,32
0,6	0,7	8320	1,52
0,7	0,8	1636	0,3
0,8	0,9	22	0
0,9	1	0	0
0	1	545836	100

Média  $\approx$  0,218

Máximo valor medido: 0,818

Mínimo valor medido: 3,6e-7

Tabela B.2 – Análise do “Equisize Skew” dos elementos de volume da malha utilizada para o modelo do colector solar otimizado fornecida pela Gambit

EQUISIZE SKEW			
Desde o valor	Até ao valor	Nº de elementos	Nº de elementos em %
0	0,1	123840	22,63
0,1	0,2	170646	31,19
0,2	0,3	119044	21,76
0,3	0,4	64794	11,84
0,4	0,5	49304	9,01
0,5	0,6	11608	2,12
0,6	0,7	6780	1,24
0,7	0,8	1145	0,21
0,8	0,9	19	0
0,9	1	0	0
0	1	547180	100

Média  $\approx$  0,216

Máximo valor medido: 0,867504

Mínimo valor medido: 1,37514e-6

Tabela B.3 – Qualidade dos elementos em função do EquiSize Skew

$Q_{EVS}$	<i>Qualidade</i>
$Q_{EVS} = 0$	Equilateral (Perfeito)
$0 < Q_{EVS} \leq 0.25$	Excelente
$0.25 < Q_{EVS} \leq 0.5$	Boa
$0.5 < Q_{EVS} \leq 0.75$	Razoável
$0.75 < Q_{EVS} \leq 0.9$	Má
$0.9 < Q_{EVS} \leq 1$	Muito má
$Q_{EVS} = 1$	Degenerado

## *Anexo C – Evolução gráfica dos resíduos*

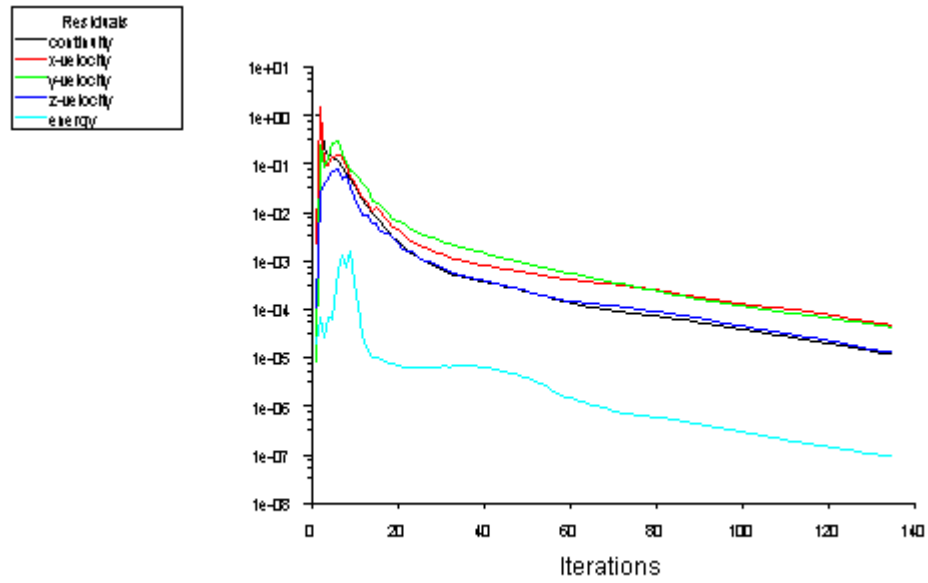


Figura C.1 – Evolução dos resíduos em função do número de iterações, na simulação efectuada para o colector solar otimizado.