

5 Resfriamento de Gás

Para analisar o tempo de resfriamento e o fluxo de calor através das paredes do duto, para o caso do gás, foram consideradas as mesmas condições iniciais já apresentadas para o caso do óleo com exceção da vazão de escoamento de regime permanente. Assim como nos casos já mencionados, no escoamento de gás no interior do duto, foram investigados tempos de resfriamento, coeficiente de transferência de calor por convecção, fluxos de calor assim como parâmetros adimensionais necessários para um melhor entendimento do processo. Os parâmetros geométricos e as propriedades da parede do duto e da camada de revestimento utilizadas na simulação foram as mesmas já especificadas anteriormente (Tabelas 4.1 e 4.2). Visando analisar uma situação realista, considerou-se o escoamento de gás pressurizado.

As propriedades utilizadas para o gás são apresentadas a seguir:

- Viscosidade absoluta: $\mu_{ref} = 1,23 \times 10^{-5} \text{ kg/(ms)}$
- Condutividade térmica: $k = 0,03011 \text{ W/(mK)}$
- Temperatura de referência: $T_{ref} = 20 \text{ }^\circ \text{C}$
- Pressão de referência: $p_{ref} = 60 \text{ kgf/cm}^2 = 5,884 \text{ MPa}$
- Constante do gás: $R_{gas} = 478,3 \text{ N m/(kg K)}$
- Peso molecular $W = 17,38 \text{ kg/kgmol}$
- Massa específica de referência: $\rho_{ref} = 42,39 \text{ kg/m}^3$
- Calor específico a pressão constante: $cp = 2812,2 \text{ J/(kgK)}$
- Coeficiente de expansão térmica: $\beta = 3,4 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$
- Difusividade térmica $\alpha = \rho / (k cp) = 2,53 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- Número de Prandtl: $Pr = 1,15$

A vazão de escoamento de regime permanente utilizada para determinação do perfil de temperatura antes do fechamento da válvula foi de 10 kg/s o que corresponde a uma velocidade média de 3,27 m/s. A temperatura de mistura considerada foi $T_m=60 \text{ C}$. Com esses dados, o número de Reynolds interno inicial

é $Re_{inicial} = 3,44 \times 10^6$. Utilizando a correlação de Sieder e Tate (Incropera e DeWitt, 1998), determinou-se o coeficiente interno de transferência de calor como sendo igual à $h_{in} = 403 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Admitiu-se que a mesma tubulação utilizada nos casos analisados anteriormente, encontra-se submersa no mar, também nas mesmas condições já consideradas, logo se especificou o mesmo coeficiente externo de troca de calor, $h_{\infty} = 2000 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

Utilizou-se a mesma malha de 4387 pontos nodais, que os casos de óleo, a qual foi selecionada a partir do teste de malha que se encontra no Apêndice A. Devido às maiores variações de temperatura com o tempo, especificou um passo de tempo igual 0,05 s, o qual é inferior ao utilizado nos casos de óleo, de forma a garantir independência da solução no passo temporal, otimizando também processo de convergência.

5.1

Modelo 2D

Os resultados obtidos para o caso do gás pressurizado, utilizando a formulação 2-D, que despreza a convecção axial, são apresentados a seguir:

A Figura 5.1 apresenta a variação da temperatura de mistura do gás ao longo do tempo. Pode-se perceber através do gráfico que após 14 horas de resfriamento o gás está praticamente à mesma temperatura do ambiente externo.

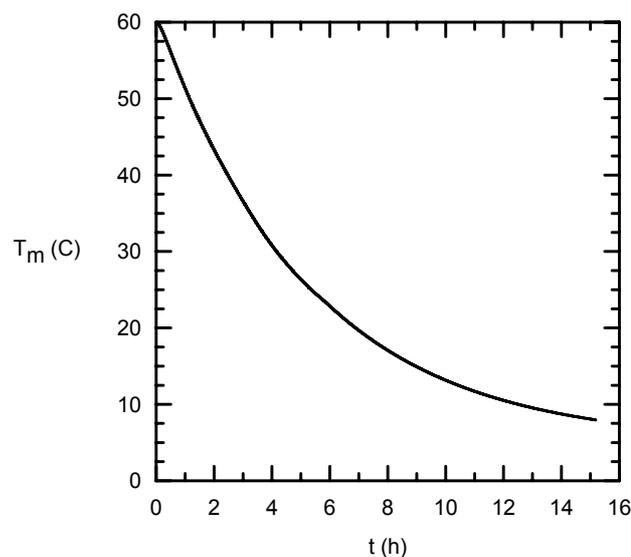


Figura 5.1 – Variação da temperatura de mistura do gás com o tempo

Isotermas espaçadas uniformemente na seção transversal do duto para o resfriamento do gás são apresentadas na Fig. 5.2. Foram selecionados três instantes de tempo para visualizar melhor o processo: $t = 2 h$, $6 h$ e $10 h$. De acordo com a Fig. 5.1, após $2 h$, pode-se observar que a temperatura do gás já diminuiu significativamente encontrando-se em torno de 42 C . Analisando a Fig. 5.2a para $t=2 h$ observa-se a uniformidade da temperatura do gás no interior do duto. O mesmo vale para os outros tempos de resfriamento. Pode-se verificar que em $t = 10 h$, o gás se encontra praticamente todo resfriado, ou seja, próximo à temperatura ambiente.

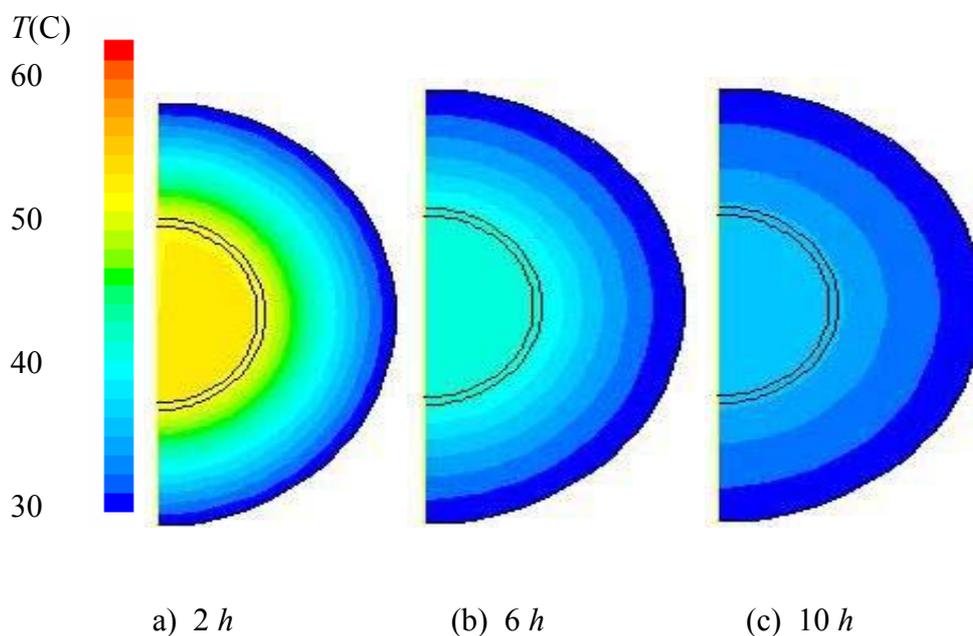


Figura 5.2 – Isolinhas de temperatura para diferentes instantes de tempo

Apesar da temperatura do gás ser aproximadamente uniforme, existe uma pequena diferença de temperatura na seção transversal, a qual induz a convecção natural. Esta diferença de temperatura pode ser visualizada na Fig. 5.3, correspondente aos mesmos três instantes de tempo, utilizadas na Fig. 5.2, porém utilizando escalas diferentes de temperatura. Neste caso, utilizou-se escala de temperatura em Kelvin. Observa-se na Fig. 5.3a, para $t = 2 h$, uma região aquecida na parte inferior da seção transversal, indicando a presença de uma recirculação. À medida que o tempo passa, apesar da temperatura cair, observa-se duas regiões mais aquecidas, indicando agora, que a estrutura do escoamento se alterou, dando origem a duas recirculações na seção transversal, Figs. 5.3b e 5.3c.

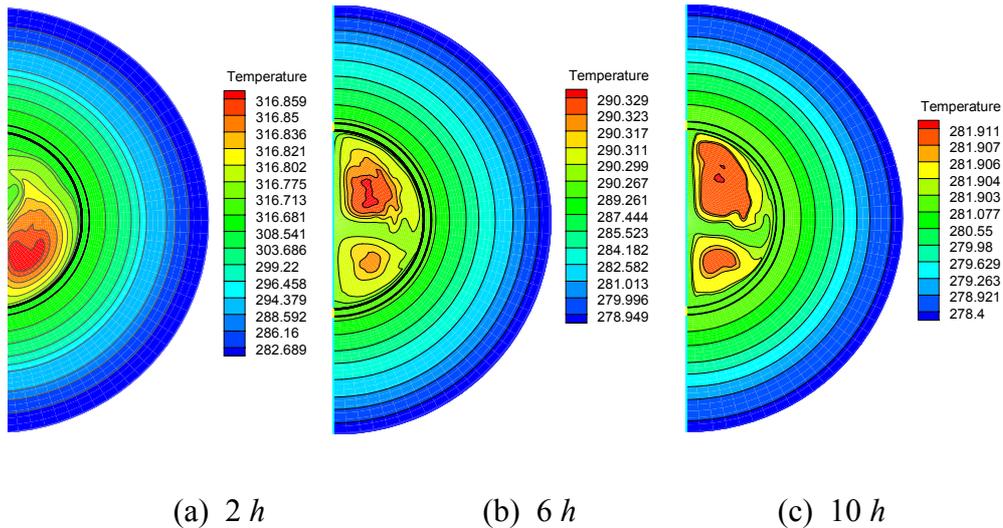


Figura 5.3 – Isolinhas de temperatura (em K) para diferentes instantes de tempo.

Para auxiliar na visualização do gradiente de temperatura no gás, o qual induz a recirculação na seção transversal, apresenta-se na Fig. 5.4, os perfis de temperatura ao longo da linha de simetria somente para a região do gás, onde se pode observar, que apesar de pequena, existe uma diferença de temperatura, a qual é responsável pelo padrão complexo de recirculações apresentado. Como já mencionado, para $t=2 h$, o fluido quente encontra-se na parte inferior da seção transversal. Observa-se ainda, que a temperatura tende a se uniformizar na seção transversal, tendendo ao valor da temperatura do mar, e reduzindo o efeito da convecção natural.

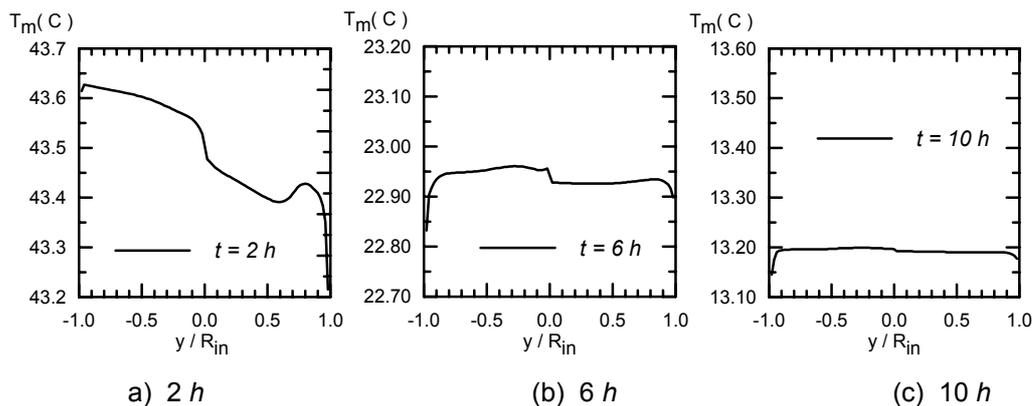


Figura 5.4 – Resfriamento no gás ao longo da linha de simetria para $t=2h$, $t=6h$ e $t=10h$

A Figura 5.5 apresenta a variação angular da temperatura na parede interna do duto, T_s , ocasionada pelo movimento do fluido na seção transversal, devido à convecção natural. De acordo com a Fig. 3.3, $\theta=0$ corresponde a parte inferior da

seção transversal. A Fig. 5.5 complementa os dados ilustrados na Fig. 5.4. Observa-se que a pequena variação da temperatura da parede. Isto pode em parte ser explicado pelo fato de ter sido considerado, como já mencionado, um coeficiente externo de transferência de calor uniforme. Pode-se observar uma redução na variação angular da temperatura no instante $t = 10 h$. Isto se deve ao fato do gás está praticamente todo resfriado nesse instante.

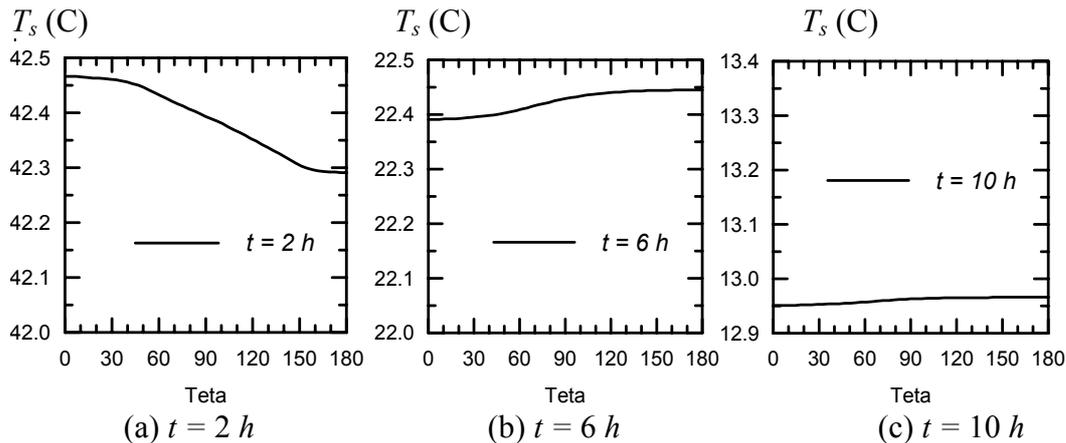


Figura 5.5 – Variação angular da temperatura da parede interna, para diferentes instantes de tempo.

Os contornos das linhas de corrente, definidas de acordo com as Eqs. (4.1), podem ser visualizados na Fig. 5.6, para seis instantes de tempo diferentes, após o início do resfriamento. Duas escalas diferentes foram utilizadas para melhor visualizar o processo ao longo do tempo. No instante de tempo $t = 2 h$, observa-se uma recirculação deslocada para a parte inferior da seção transversal, que como foi visto na Fig. 5.3a, encontra-se mais quente. Após mais duas horas de resfriamento, nota-se que a estrutura do escoamento começa a se alterar com o surgimento de uma nova recirculação na parte superior da seção transversal, Fig. 5.6b. Percebe-se claramente nas Figs. 5.6b e 5.6c, a mudança na estrutura do escoamento entre os instantes de tempo $t = 4h$ e $t = 6h$, com o crescimento da segunda recirculação ocorreu, que aumenta de intensidade para $t=8h$. A partir de $t = 10 h$, como o fluido já está quase totalmente resfriado, a estrutura do escoamento se estabiliza, como pode ser visto nas figuras 5.6e e 5.6f.

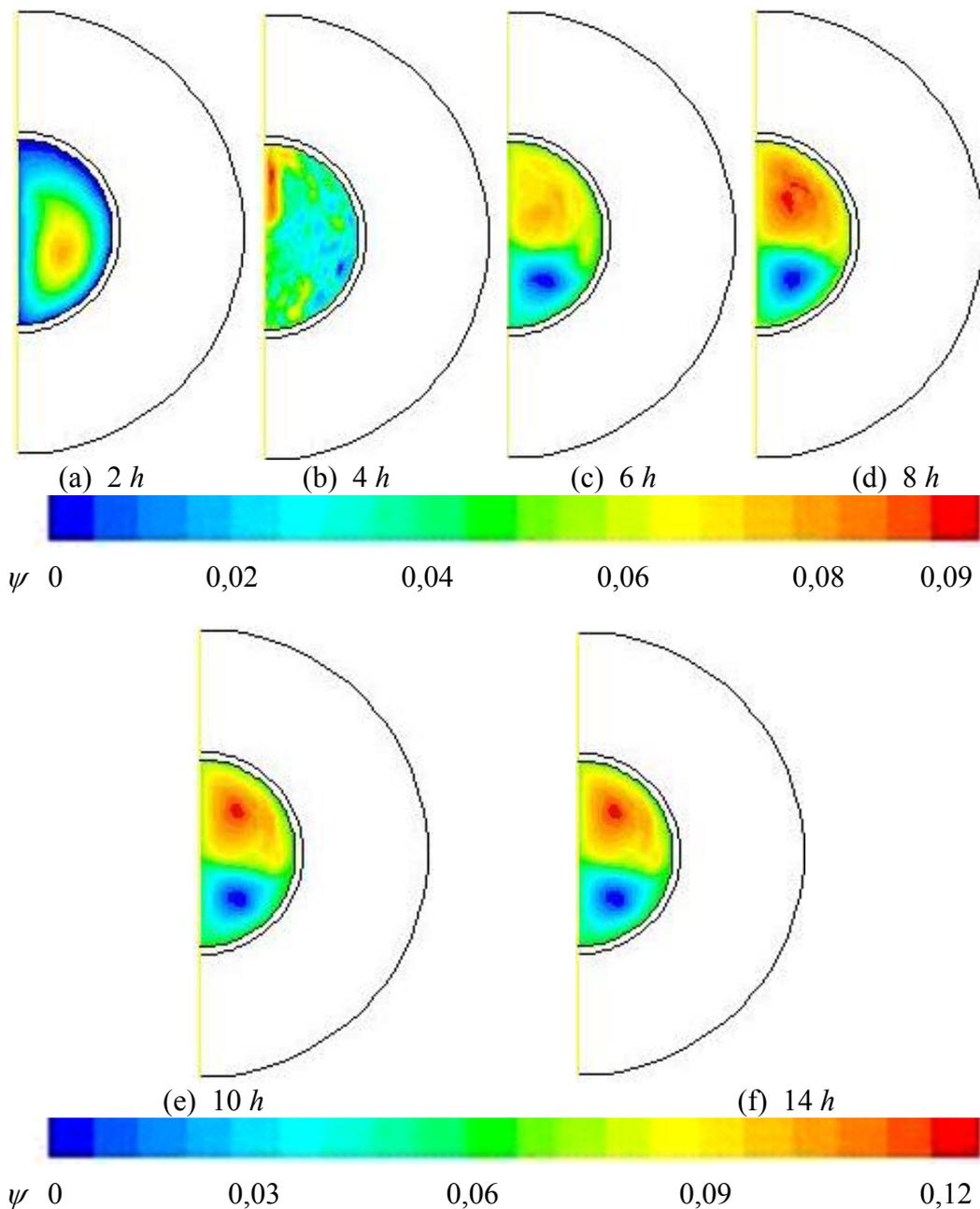


Figura 5.6 – Contornos das linhas de corrente para diferentes instantes de tempo

A Fig. 5.7 ilustra a variação temporal da diferença entre a temperatura de mistura do gás e da parede da camada de aço. Inicialmente, há um aumento significativo na diferença entre as temperaturas, devido ao resfriamento mais rápido da tubulação. Os efeitos da convecção natural começam a aparecer, aumentando a mistura do gás, uniformizando a temperatura na seção transversal, reduzindo a diferença entre a temperatura do gás e da parede. Observa-se um aumento na diferença das temperaturas, pouco antes das 6 horas após o fechamento da válvula. Essa mudança de comportamento pode ser explicada pela mudança na estrutura do escoamento, com o surgimento da segunda recirculação,

como já mencionada acima. Pode-se perceber que para $t = 14 h$, esta diferença de temperaturas já é muito pequena, menor que 0,1, indicando assim que o gás e as camadas do duto se encontram totalmente resfriadas.

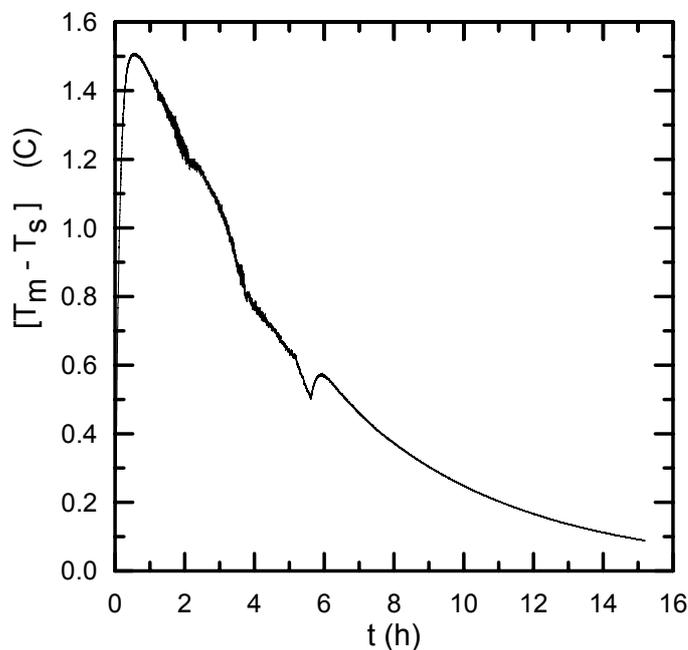


Figura 5.7 – Variação temporal da diferença entre a temperatura de mistura do gás e da parede do aço

A Figura 5.8 apresenta a variação dos fluxos de calor através de cada camada do duto com o tempo. São ilustrados os fluxos de calor através da parede interna do duto, entre o duto e a camada de isolamento e através da parede externa de isolamento. Observa-se que devido à baixa condutividade térmica do gás, o fluxo de calor entre o gás e a parede do duto apresenta a menor contribuição. Este comportamento não é observado no caso dos óleos, Fig. 4.24, onde o menor fluxo é entre o isolante e o ambiente. Para ambos os fluidos o maior fluxo de calor encontra-se entre as camadas de aço e isolante.

A taxa de transferência de calor através das mesmas paredes no duto é ilustrada na Fig. 5.9. Pode-se observar que à medida que o tempo aumenta, como a temperatura cai, a energia armazenada diminui e as taxas de transferência de calor se aproximam. Assim como para o caso do óleo, Fig. 4.24, observa-se a importância da energia armazenada na camada de aço apesar de sua pequena espessura. Como esperado, para os dois tipos de fluido, a maior taxa de transferência de calor, ocorre entre o isolante e o ambiente marinho, devido à maior área de troca desta superfície.

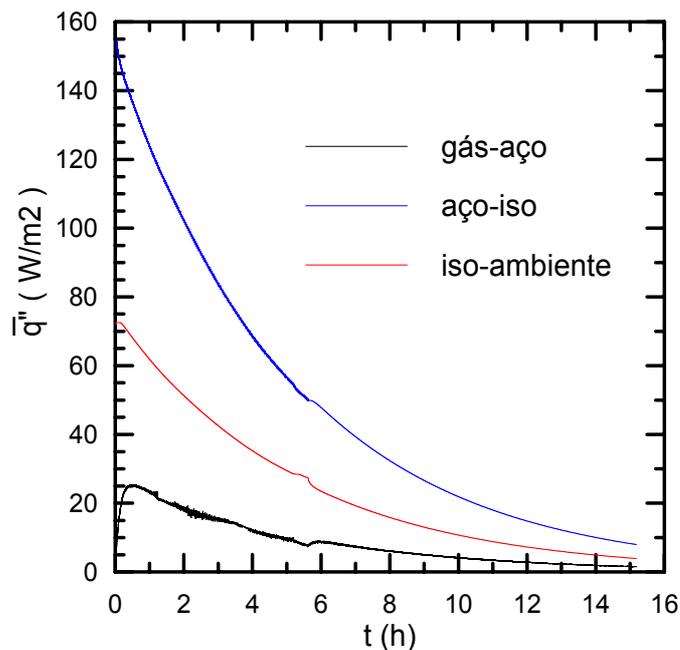


Figura 5.8 – Variação do fluxo de calor com o tempo para o gás

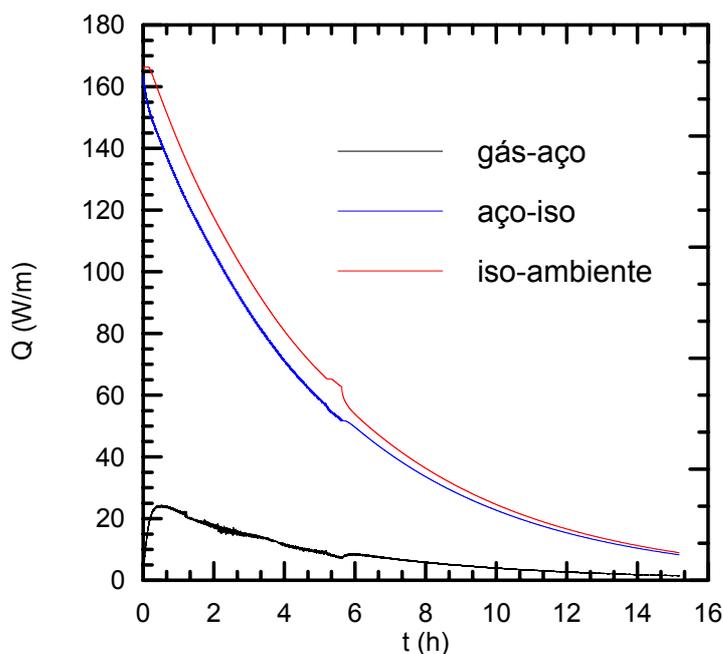


Figura 5.9 – Taxa de Transferência de calor por unidade de comprimento para o gás

Com os dados do fluxo de calor na parede interna do duto, temperatura de mistura do gás e temperatura da parede do duto, foi possível calcular o coeficiente de transferência de calor ao longo do tempo através da Eq. (3.55) e posteriormente o número de Nusselt através da Eq. (3.54).

A Fig. 5.10 apresenta o comportamento do Nusselt ao longo do tempo. À medida que o tempo passa, a diferença de temperatura entre o gás e parede diminui assim como a taxa de transferência de calor. Após aproximadamente 3

horas, observa-se uma mudança do comportamento do Nusselt com o tempo. Essa mudança de comportamento pode ser melhor compreendida pelos complexos padrões de recirculações e mudanças na estrutura do escoamento no interior do duto ilustrados na Fig. 5.6.

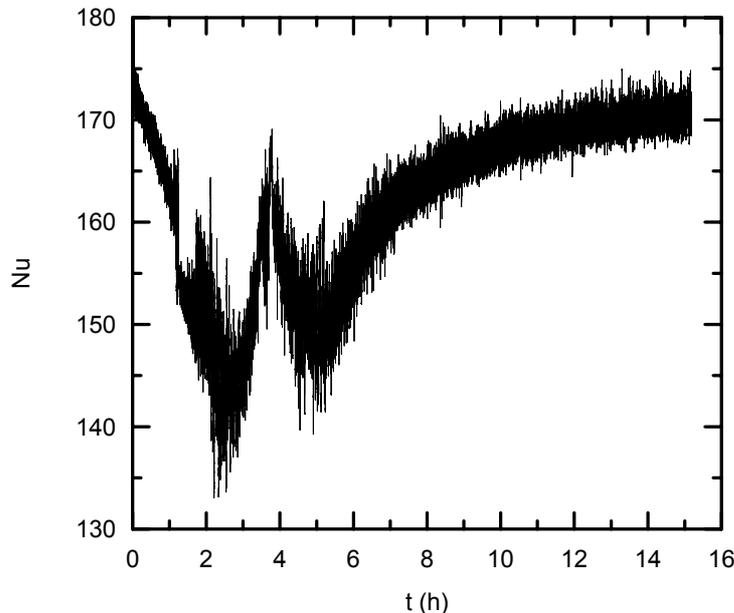


Figura 5.10 – Variação do Nusselt com o tempo para o gás

O comportamento do número de Grashof instantâneo, definido na Eq. 4.8, é apresentado na Fig. 5.11. Note que a variação do Grashof com o tempo, assim como no caso do óleo, é igual à variação $T_m - T_s$, apresentada na Fig. 5.7, uma vez que os dois termos diferem entre si apenas por constantes, Eq. 4.8. Observa-se que no início do resfriamento o número de Grashof é baixo e aumenta rapidamente até aproximadamente $t = 1 h$, quando então começa a cair. No início do resfriamento, a diferença entre as temperaturas cresce, devido à diferença entre a capacidade térmica do óleo e da parede do duto. No entanto, com a queda de temperatura do óleo, a massa específica se altera, dando início ao fenômeno de convecção natural, diminuindo a diferença entre as duas temperaturas e conseqüentemente o Grashof.

Visando buscar uma correlação entre o número de Nusselt e Grashof para fornecer a um simulador unidimensional, traçou-se na Fig. 5.12 um gráfico do número de Nusselt versus o número de Grashof. Como pode ser observado, assim como no caso do óleo, nenhuma correlação pode ser retirada a partir destes dados.

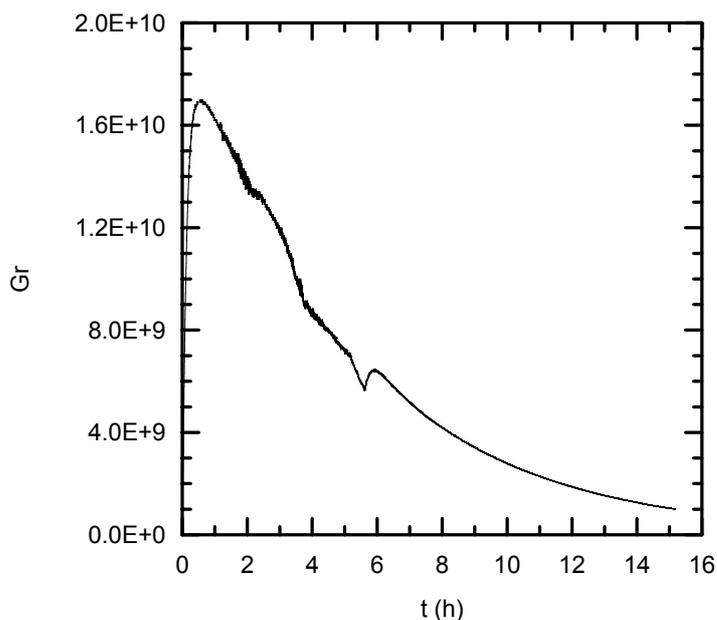


Figura 5.11 – Variação do Grashof com o tempo para o gás

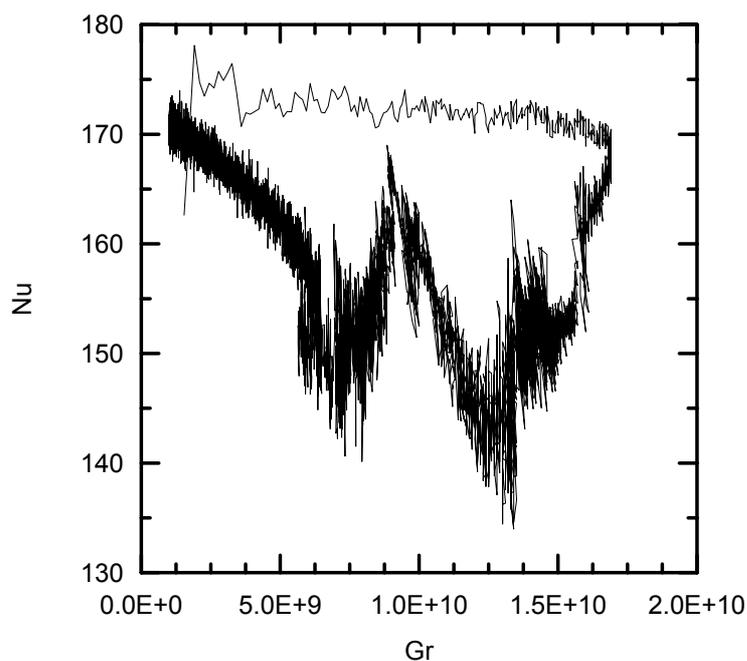


Figura 5.12 – Número de Nusselt versus número de Grashof

A Figura 5.13 apresenta uma comparação entre o gás e o óleo com o objetivo de estudar de maneira adimensional os comportamentos da variação de temperatura ao longo do tempo. No gráfico é ilustrada a variação da temperatura adimensional Φ , Eq. (3.44), ao longo do tempo adimensional, Fourier, Fo , definido pela Eq. (3.46). Pode-se perceber uma equivalência no comportamento dos dois fluidos.

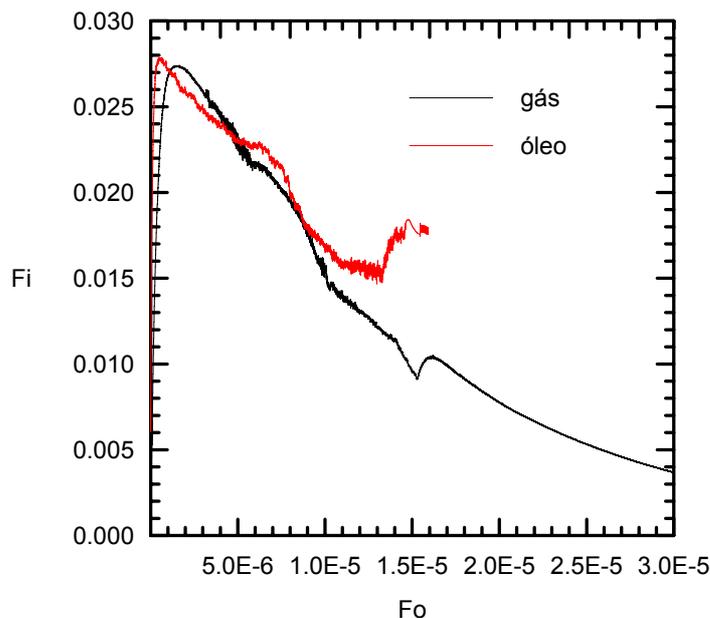


Figura 5.13 – Variação da temperatura adimensional com o Fourier para o gás e óleo

5.2 Modelo 2D x Modelo 1D

Nesta seção é apresentada uma comparação entre as soluções obtidas pelo modelo bidimensional e unidimensional para o caso do gás.

O modelo unidimensional utilizado para comparar os resultados foi o mesmo utilizado na comparação no caso do óleo, sendo este desenvolvido no trabalho de Barrera (2005). Os detalhes do modelo estão especificados na seção 4.1.2.

Inicialmente, considerou-se o gás entrando na tubulação a 60 C, utilizando um procedimento análogo ao que foi realizado no caso do óleo. A Figura 5.14 ilustra a variação temporal da temperatura do gás obtida como o modelo 2-D e da temperatura em diversas coordenadas espaciais diferentes ao longo da tubulação 1-D. Observa-se uma grande variação da temperatura entre as diversas posições axiais. Antes do fechamento da válvula, no centro do duto, a temperatura do gás encontra-se a 38 C. Nota-se que a comparação da solução obtida na coordenada central com o modelo 2-D é inviável, uma vez que no instante inicial as temperaturas já são muito diferentes.

De forma a ser possível comparar a solução obtida com o modelo 2-D e com a solução da seção central do modelo 1-D, aumentou-se a temperatura do gás na seção da entrada para 99 C. Desse modo a temperatura inicial na seção central do modelo 1-D foi igual à temperatura inicial do caso 2-D, i.e. 60 C.

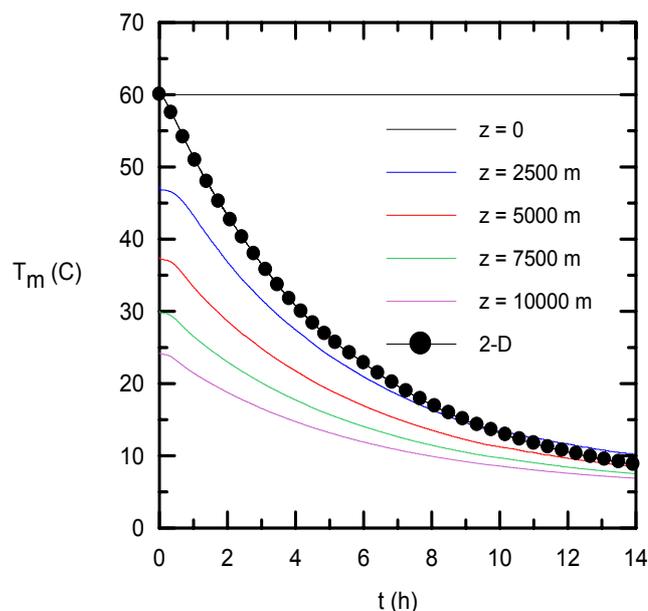


Figura 5.14 – Variação da temperatura de mistura do gás ao longo do tempo

A Figura 5.15 apresenta para o caso 1-D, a variação da temperatura do gás pressurizado ao longo do duto para a condição inicial de regime permanente, ao injetar a gás a 99 C. Na mesma figura, encontra-se ilustrado o perfil de temperatura para diferentes instantes de tempo após o fechamento da válvula. Observa-se uma queda da temperatura com um subsequente aumento na região próxima a entrada, a qual poderia ser explicada pela variação brusca da pressão após o fechamento da válvula. Observa-se que a variação da temperatura de mistura do gás ao longo do duto é bem superior que a observada no caso do óleo leve, Fig. 4.17.

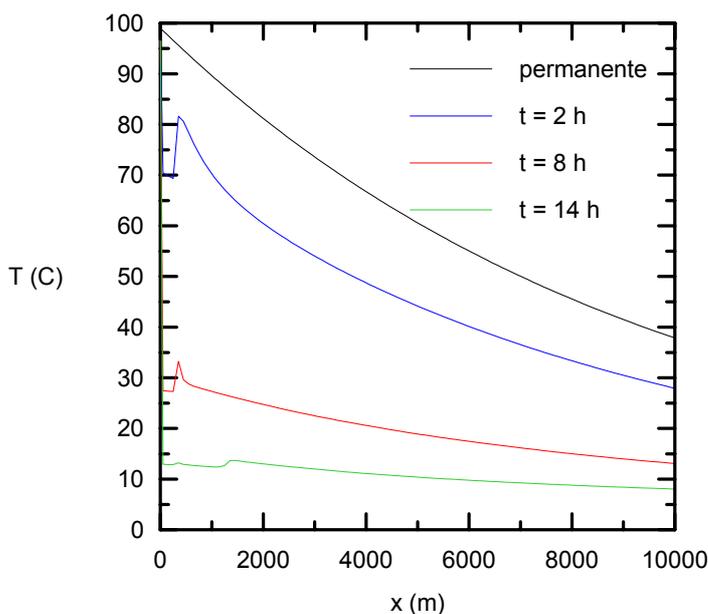


Figura 5.15 – Resfriamento ao longo do duto para o gás pressurizado, para diversos instantes de tempo. Modelo 1-D

A grande variação da temperatura ao longo do duto pode ser atribuída em grande parte a massa específica, a qual no modelo unidimensional é obtida pela lei dos gases ideais, sendo, portanto afetada não só pela temperatura, mas também pela pressão. Adicionalmente a condutividade do gás é uma ordem de grandeza menor do que a dos óleos, reduzindo a difusão de calor.

A Figura 5.16 apresenta a comparação da variação temporal da temperatura do gás pressurizado do modelo bidimensional e a temperatura no centro do duto no caso unidimensional. Pode-se observar que o comportamento do resfriamento dos dois modelos é equivalente com erro médio de 3,3%.

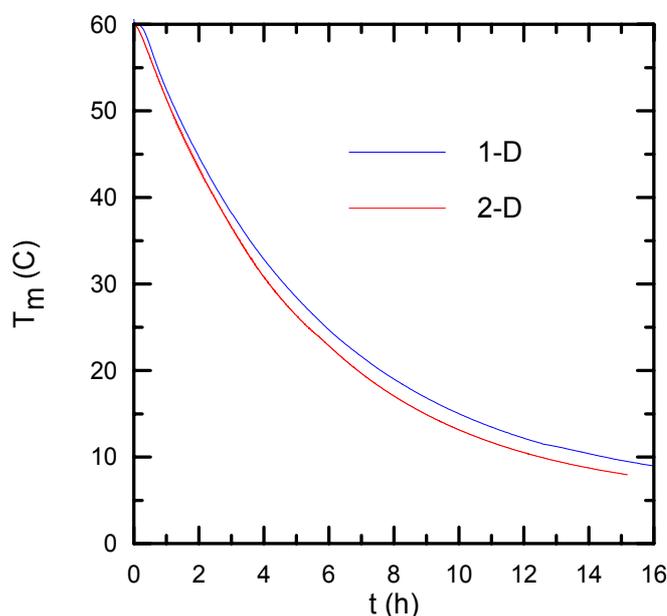


Figura 5.16 – Comparação entre modelos 1-D e 2-D do resfriamento ao longo do tempo para o gás pressurizado

Uma comparação dos fluxos de calor obtidos com os modelos uni e bidimensionais é apresentada na Figura 5.17. Novamente, observa-se uma boa concordância entre os modelos com erro médio de 2,6% na interface fluido-aço, 2,7% na interface aço-isolante e 2,4% entre a camada do isolante e o ambiente.

Na Figura 5.18 é apresentada uma comparação do Nusselt para os dois modelos simulados. Pode-se perceber uma diferença significativa nos valores e no comportamento do número de Nusselt obtidos com os dois modelos, apesar da temperatura e dos fluxos de calor terem apresentado uma boa concordância. Como já mencionado na seção 4.1.2, devido às pequenas diferenças entre as temperaturas do gás e da parede do duto, a influência do número de Nusselt nos

resultados é pequena, levando a uma excelente concordância entre os fluxos e temperaturas obtidos com os 2 modelos, apesar da grande diferença entre os números de Nusselt.

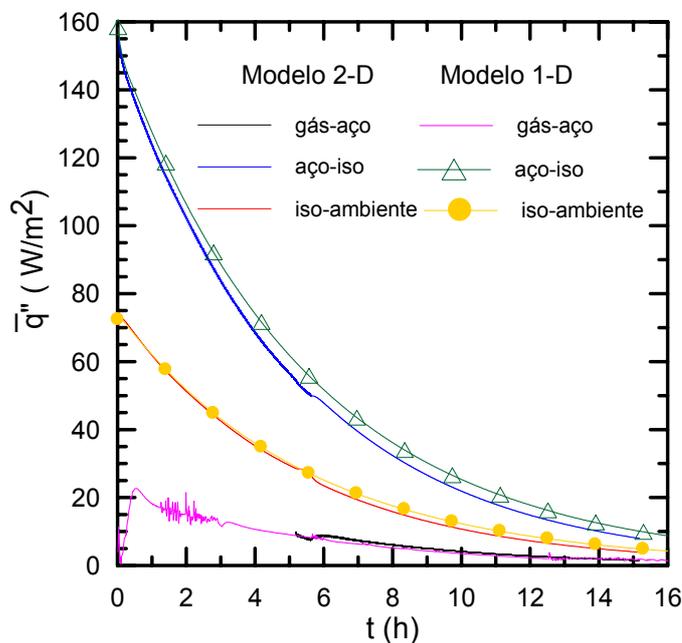


Figura 5.17 – Variação do fluxo de calor com o tempo para o gás

Mais uma vez pode-se concluir que apesar das correlações utilizadas no modelo 1D para determinar o número de Nusselt serem baseadas em escoamento hidrodinamicamente e termicamente desenvolvido em regime permanente, os resultados obtidos com este modelo mais simples são plenamente satisfatórios.

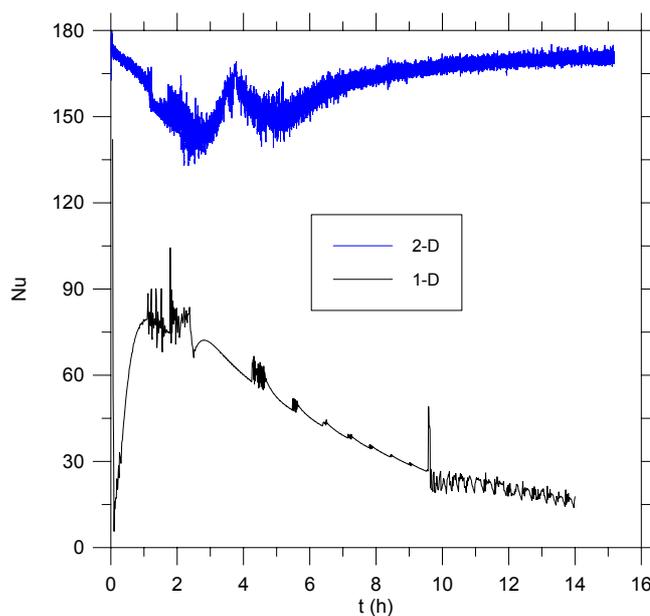


Figura 5.18 – Variação do número de Nusselt com o tempo para o gás

Observa-se na Fig. 5.19 que os dois modelos apresentam uma tendência equivalente do número de Grashof com o tempo, indicando uma similaridade no comportamento do Grashof para os modelos uni e bidimensionais. Este comportamento já era esperado, pois como já analisado, o número de Grashof é diretamente proporcional a diferença de temperatura entre o gás e a parede do duto, e a temperaturas dos dois modelos apresentam comportamento análogo.

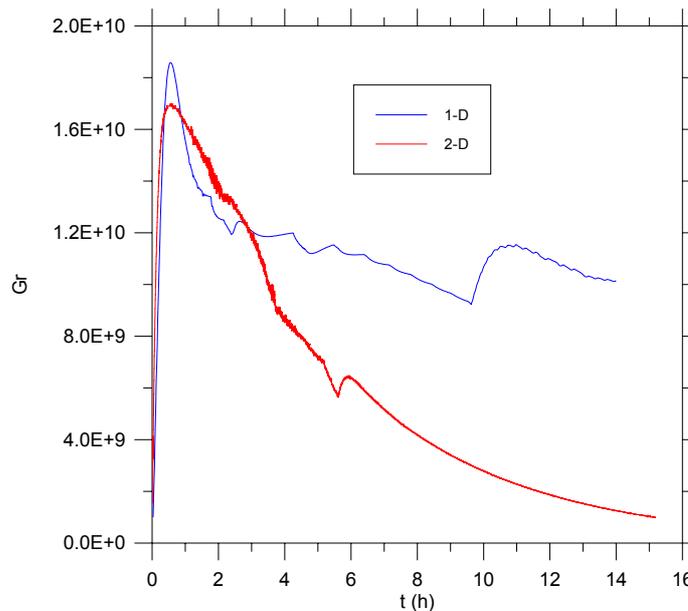


Figura 5.19 – Variação do número de Grashof com o tempo para o gás

A partir dos resultados obtidos conclui-se que o modelo 2-D, o qual despreza a convecção axial, porém avalia com precisão a convecção natural, apresentou um resultado análogo ao obtido com o modelo 1-D, baseado em correlações empíricas. Este resultado é animador, pois indica que as soluções mais simples e baratas dos modelos unidimensionais são satisfatórias. No entanto, visando eliminar as dúvidas referentes às aproximações utilizadas no modelo 2-D, e buscar uma melhor correlação entre os números de Nusselt, tornou-se necessário realizar um estudo tri-dimensional.