

5 Resultados

Neste capítulo, são apresentados sob forma de tabelas os dados operacionais e as propriedades físico-químicas utilizados no processo de absorção CO₂-MEA.

Em seguida são apresentados a comparação e os resultados obtidos. Eles são mostrados por meio de figuras, considerando diferentes condições de entrada do fluxo de líquido e do fluxo de gás, e as principais grandezas que influenciam no processo.

5.1 Dados Operacionais e Físicos Químicos

Na Tabela 5.1 são mostradas as principais características e condições operacionais de uma coluna de absorção, baseadas em Akanksha et al., (2007). As propriedades físico-químicas utilizada nas simulações encontram-se na Tabela 5.2, com suas correspondentes referências.

Tabela 5.1- Características e condições operacionais para a coluna de absorção

Parâmetro	Valor
Diâmetro, D	0,014 m
Altura, L	1 m
Concentração de entrada de CO ₂ , C_{AG}	12% mol
Temperatura da solução	298 K
Pressão	101,32 kPa
Concentração de entrada de MEA, C_B	30% em peso
Faixa de velocidade de líquido u_L	0,02 a 0,055 m/s
Faixa de velocidade de gás w_G	0,11 a 0,35 m/s
Faixa de Número de Reynolds do gás R_{eG}	115 a 350
Faixa de Número de Reynolds do líquido R_{eL}	4 a 32

Tabela 5.2- Propriedades físico-químicos utilizados no sistema CO₂-MEA

Dado	Valor	Referência
Densidade, ρ_L	1010 kg/m ³	Akanksha
Viscosidade, μ_L	2,41x10 ⁻³ kg/m.s	Akanksha
Condutividade térmica de líquido, k_λ	0,4837 W/m.K	Akanksha
Tensão superficial, σ	55,1x10 ⁻³ N/m	Akanksha
Difusividade do CO ₂ líquido, D_A	1,42x10 ⁻⁹ m ² /s	Akanksha
Difusividade de MEA, D_B	1,10x10 ⁻⁹ m ² /s	Akanksha
Difusividade do CO ₂ gás, D_G	1,67x10 ⁻⁵ m ² /s	Akanksha
Densidade da mistura de gás, ρ_G	1,248 kg/m ³	Akanksha
Viscosidade da mistura de gás, μ_G	1,72x10 ⁻⁵ kg/m.s	Akanksha
Constante de Henry, H_o	0,316x10 ⁻³ kg/m.s	Akanksha
Calor de reação, ΔH_R	65x10 ⁶ J/kmol	Akanksha
Calor de solução, ΔH_S	19,5x10 ⁶ J/kmol	Akanksha
Coeficiente global de transferência de calor da água de refrigeração, U	204,417 W/m ² K	Ludwing
Temperatura de água refrigeração, T_R	298 K	Johnson
Número de Nusselt, Nu	3,66	Kolev
Condutividade térmica da mistura de gases, λ_G	2,4162 W/m.K	Reid
Capacidade térmica molar da mistura, C_G	30,1 J/kmol K	Warren
Capacidade de térmica do líquido, ρC_p	36,8 x10 ⁵ J/m ³ K	Kohl

5.2

Validação de Modelo

A maioria das configurações utilizadas no processo de absorção de CO₂ foi baseada no trabalho de Akanksha et al., (2007). Visando comparar os resultados obtidos no presente trabalho com os dados da literatura, selecionou-se os trabalhos experimental e numérico deles.

Nas Figuras 5.1 e 5.2, são comparados os resultados obtidos neste trabalho como os resultados experimentais e simulados apresentados por Akanksha et al.,

(2007).

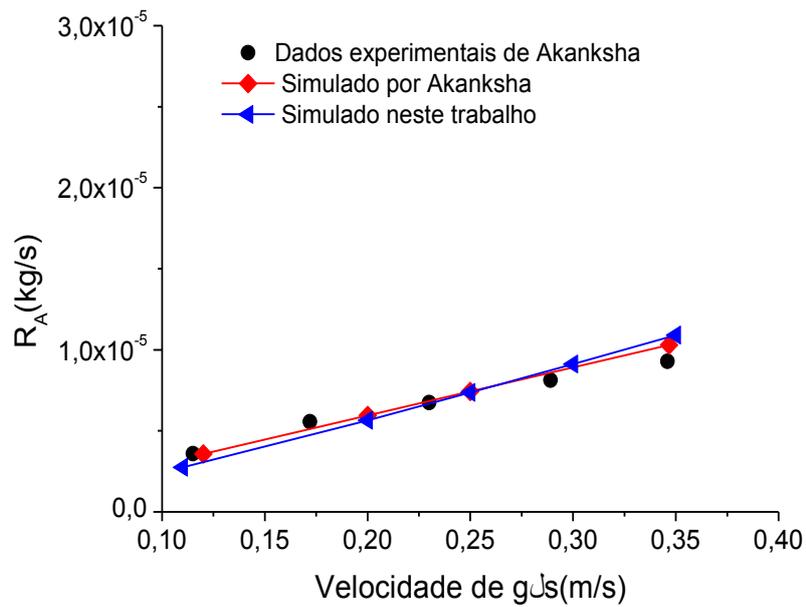


Figura 5.1- Comparação da taxa de absorção de CO₂ (R_A) com os dados experimentais e simulados por Akanksha et. al, (2007) para u_L=0,0412m/s.

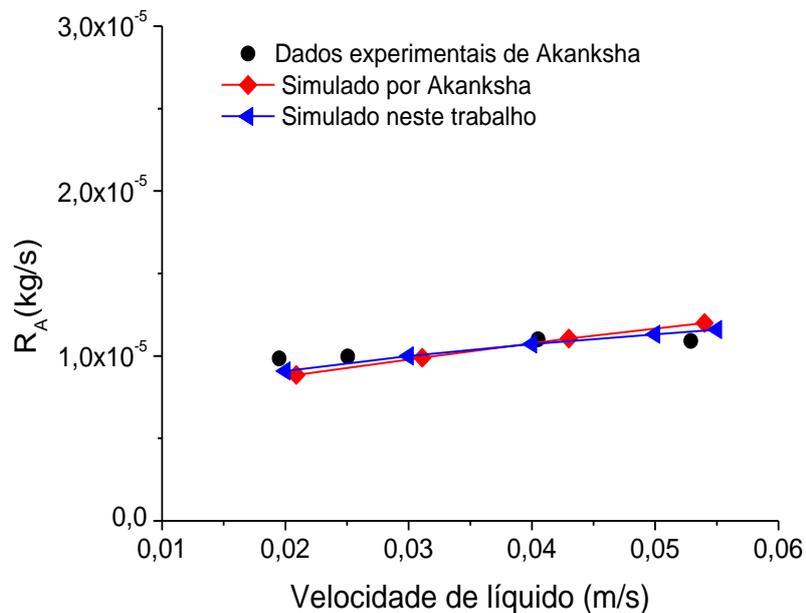


Figura 5.2- Comparação da taxa de absorção de CO₂ (R_A) com os dados experimentais e simulados por Akanksha et. al, (2007) para u_G=0,3467m/s.

Uns dos testes realizados para a comparação fez-se variando a velocidade do gás e mantendo-se constante a velocidade do líquido. O resultado obtido é a taxa de absorção que é apresentado na Figura 5.1, verifica-se que os resultados do presente trabalho estão mais afastados dos dados experimentais do que os

resultados numéricos de Akanksha. Por outro lado, observa-se na Figura 5.1 que a quantidade de CO_2 absorvido cresce mais rapidamente comparado com a Figura 5.2, na medida em que se aumenta a velocidade de gás.

Outro resultado da taxa de absorção variando-se a velocidade do líquido e mantendo-se constante a velocidade do gás é apresentada na Figura 5.2. Mostra-se que os resultados obtidos estão mais próximos aos dados experimentais do que os resultados numéricos de Akanksha.

5.3 Perfis de Velocidades do Líquido

Da solução da equação de quantidade de movimento linear, obtêm-se os perfis de velocidades do filme líquido na direção “z”, apresentando a velocidade mínima na parede e a máxima na interface gás-líquido. Conforme as Figuras 5.3 e 5.4.

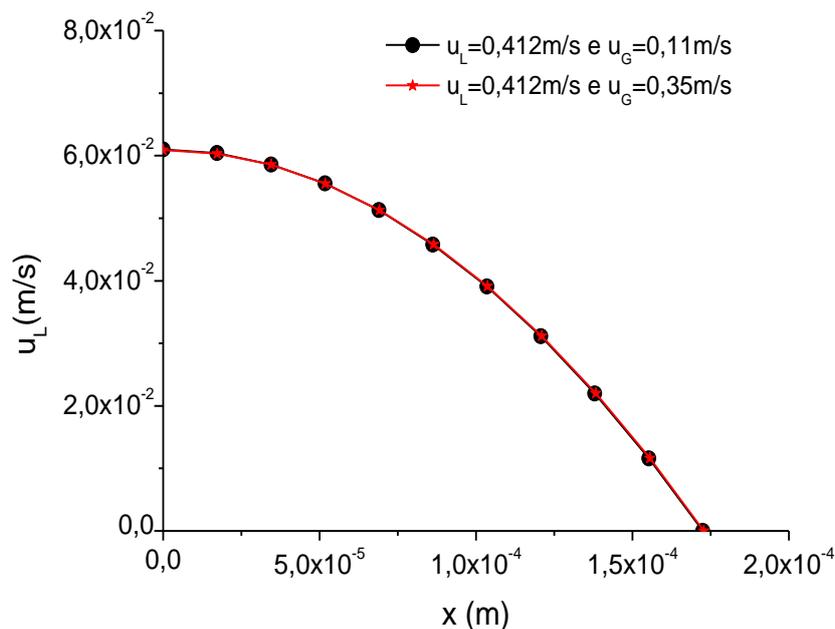


Figura 5.3- Perfil de velocidades do filme líquido para o primeiro caso

O primeiro caso da simulação foi obtido variando-se a velocidade do gás e mantendo-se constante a velocidade do líquido. Na Figura 5.3 têm-se os perfis de velocidades do filme líquido, e observa-se que para o valor mínimo e máximo da velocidade do gás, os perfis de velocidade do líquido são bem semelhantes, e vê-se também, a espessura do filme líquido é aproximadamente igual.

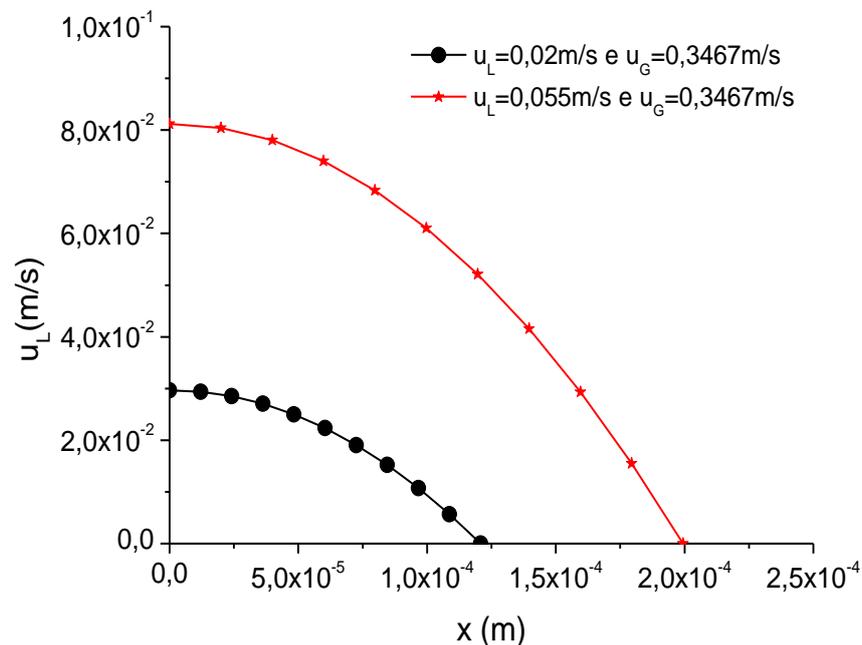


Figura 5.4- Perfis de velocidades do filme líquido para o segundo caso

Na Figura 5.4 apresenta-se o segundo caso da simulação variando-se a velocidade do líquido e mantendo-se constante a velocidade do gás. Observa-se que para o valor mínimo e máximo da velocidade do líquido, os perfis de velocidade do filme líquido são bem distintos, em contrapartida, a espessura do filme para a velocidade máxima do líquido é bem maior do que para a velocidade mínima do líquido.

5.4 Perfis da Região do Líquido Variando a Velocidade do Gás

Os resultados obtidos variando a velocidade do gás e mantendo-se constante a velocidade do líquido são mostrados nas Figuras de 5.5 a 5.10. Elas representam o comportamento das grandezas ao longo da coluna de absorção, por exemplo, temperatura do filme líquido, concentração de CO₂ absorvido e a concentração de MEA.

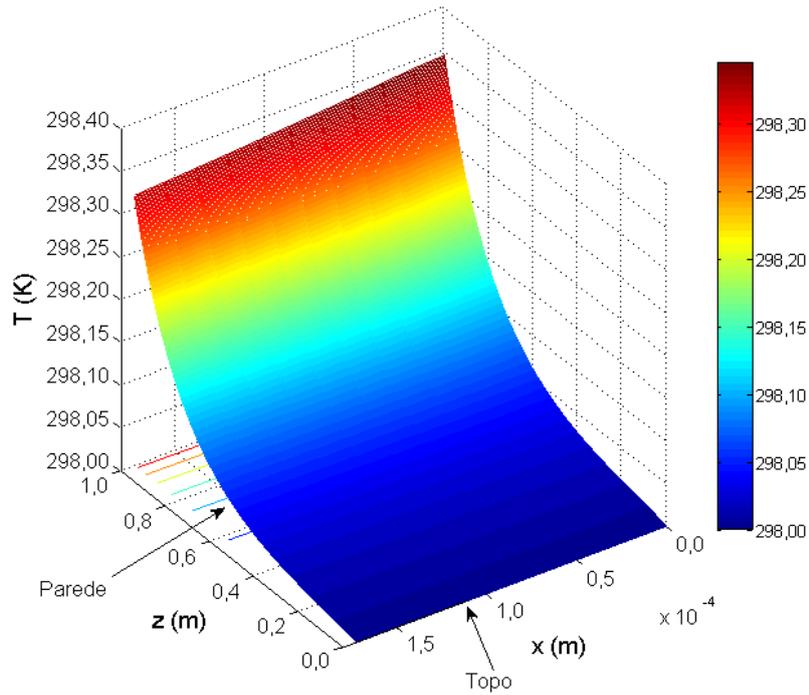


Figura 5.5- Variação da temperatura na região do líquido ao longo da coluna para $u_G=0,11\text{m/s}$ e $u_L=0,0412\text{m/s}$

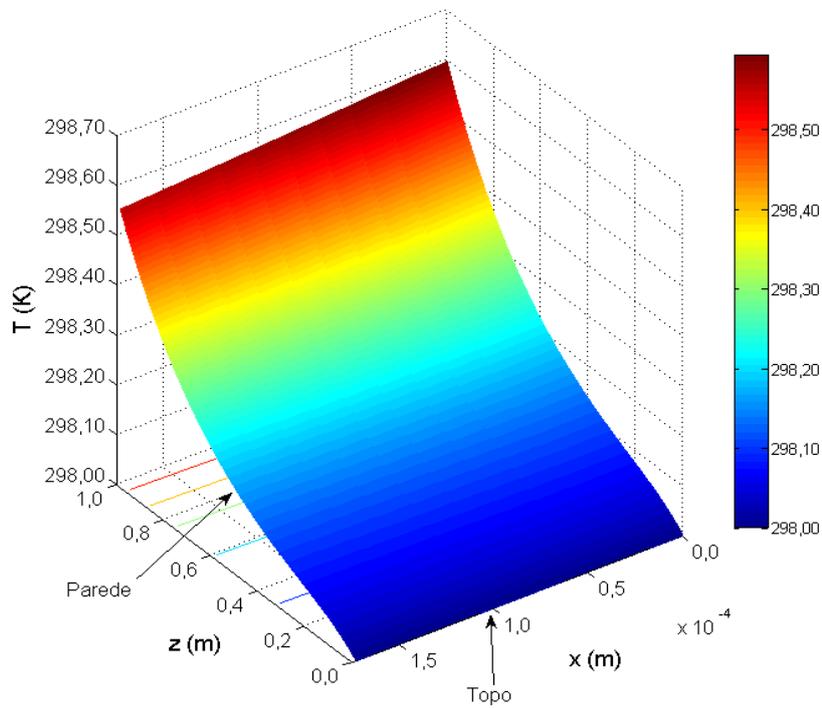


Figura 5.6- Variação da temperatura na região líquido ao longo da coluna para $u_G=0,35\text{m/s}$ e $u_L=0,0412\text{m/s}$

Nas Figuras 5.5 e 5.6, são apresentadas as variações da temperatura na região do líquido. Em ambas a temperatura aumenta ao longo da coluna, na direção “z” do topo para o fundo, e na direção “x” da parede para a interface gás-líquido. Na parede, a temperatura é menor do que na interface, devido ao esfriamento da MEA com a água de resfriamento que circula na camisa externa da coluna. Na interface, há troca de calor da região do gás para a região do líquido e troca de calor pela reação química que ocorre próxima da zona da interface. Observa-se também, nas duas Figuras, que quanto maior o fluxo de gás, maior é o aumento de temperatura da MEA.

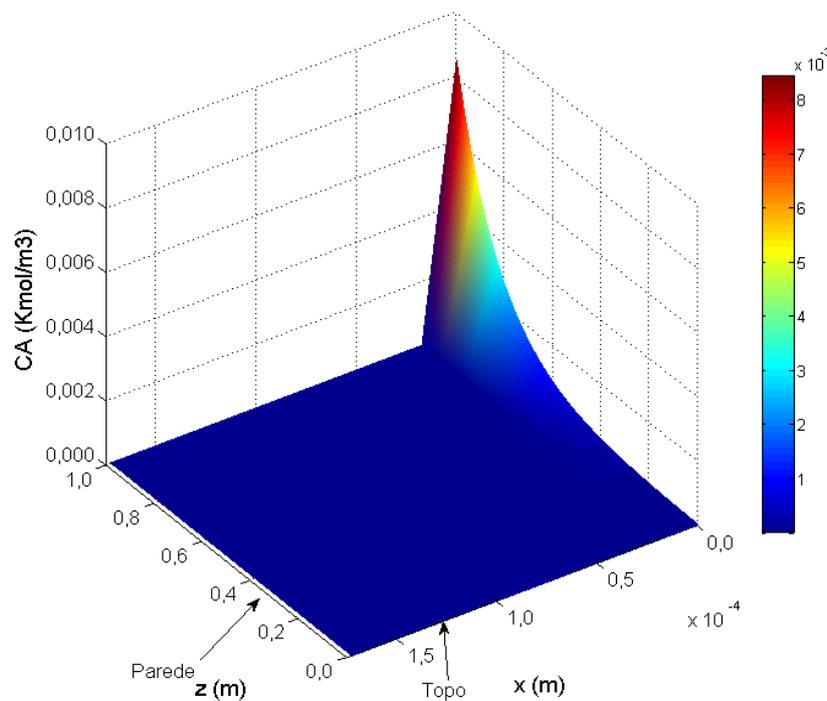


Figura 5.7- Variação da concentração de CO_2 absorvido na região do líquido ao longo da coluna para $u_G=0,11\text{m/s}$. e $u_L=0,0412\text{m/s}$

Nas Figuras 5.7 e 5.8, são mostradas as variações da concentração de CO_2 absorvido em MEA. Observando-se que toda a concentração de CO_2 concentra-se na zona próxima à interface. O aumento da concentração ocorre na direção “z” do topo para o fundo da coluna das duas Figuras. Quanto maior for o fluxo de gás maior será a quantidade de CO_2 absorvido em MEA. Nota-se também que entre as duas Figuras há uma variação brusca da concentração no topo da coluna.

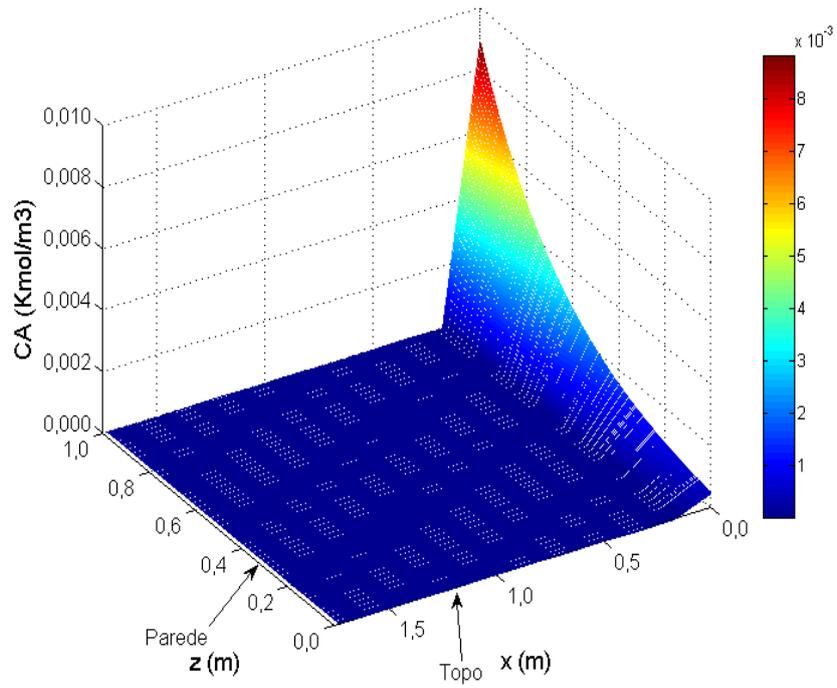


Figura 5.8- Variação da concentração de CO₂ absorvido na região do líquido ao longo da coluna para $u_G=0,35\text{m/s}$ e $u_L=0,0412\text{m/s}$

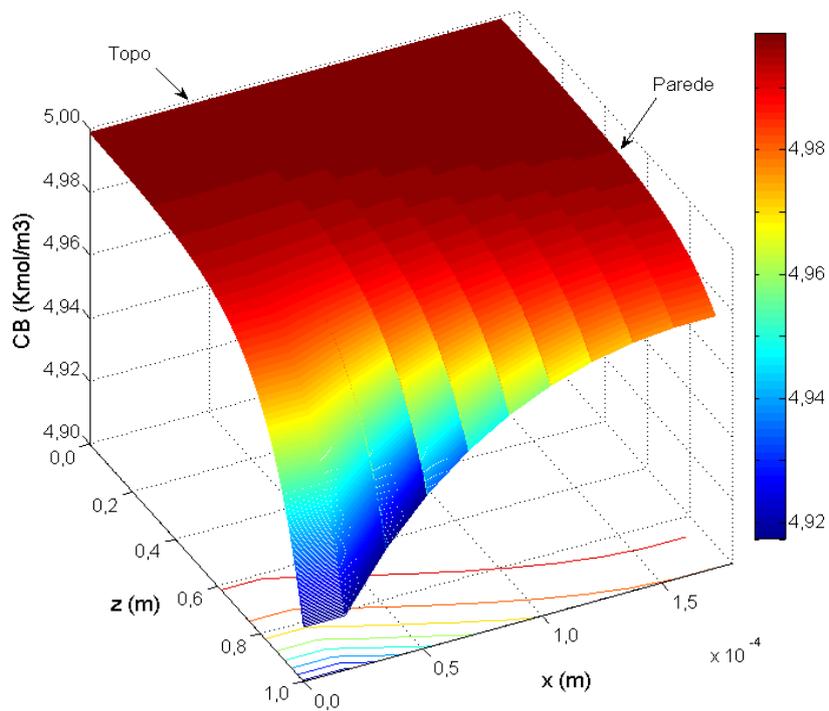


Figura 5.9- Variação da concentração de MEA na região do líquido ao longo da coluna para $u_G=0,11\text{m/s}$ e $u_L=0,0412\text{m/s}$

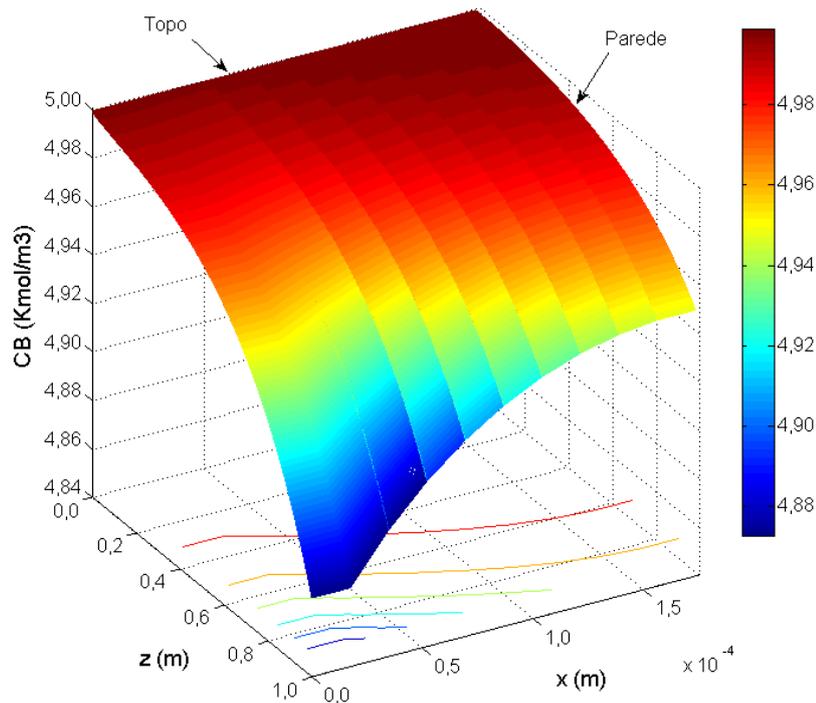


Figura 5.10- Variação da concentração de MEA na região do líquido ao longo da coluna para $u_G=0,35\text{m/s}$ e $u_L=0,0412\text{m/s}$

As variações da concentração de MEA são mostradas nas Figuras 5.9 e 5.10. A concentração de MEA na zona próxima a parede, diminui lentamente do topo para o fundo da coluna, enquanto na interface, ocorre um decréscimo acentuado especificamente próximo ao fundo da coluna.

Para baixos fluxos de gás, a queda não é tão pronunciada, como se pode distinguir nas duas Figuras. Tem-se também que o decréscimo da concentração de MEA aumenta nas zonas de maior temperatura

5.5 Perfis da Região do Líquido Variando a Velocidade do Líquido

Neste caso, mantendo-se constante a velocidade do gás como mostradas nas Figuras de números 5.11 a 5.16 é apresentado o comportamento das grandezas ao longo da coluna de absorção, tais como: temperatura, concentração de CO_2 absorvido e concentração de MEA.

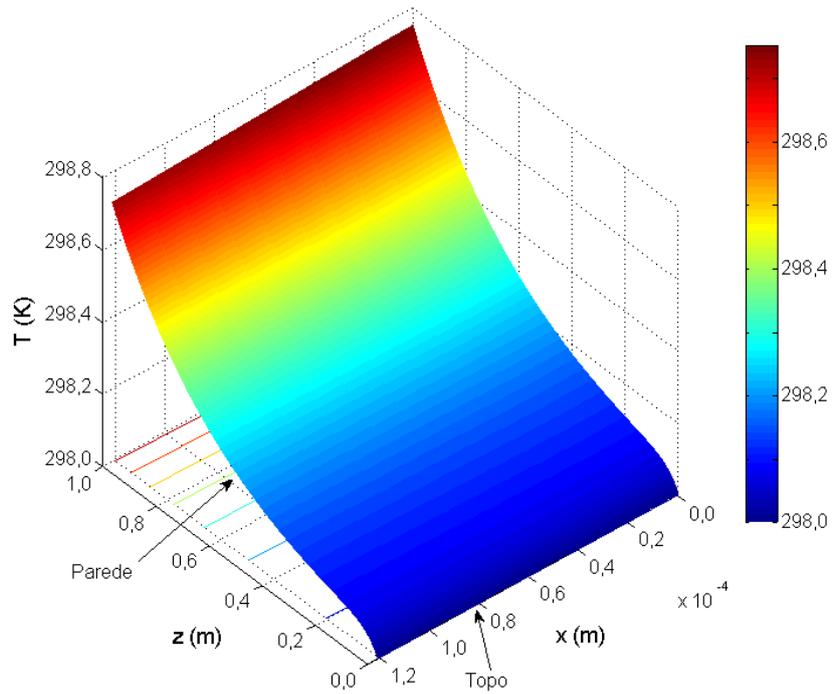


Figura 5.11- Variação da temperatura na região do líquido ao longo da coluna para $u_L=0,02\text{m/s}$ e $u_G=0,3467\text{m/s}$

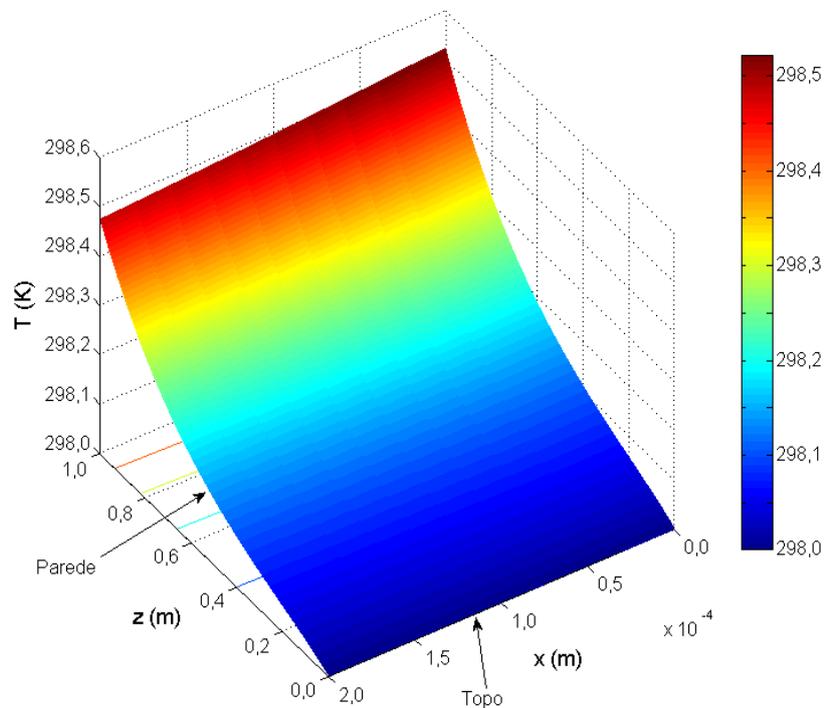


Figura 5.12- Variação da temperatura na região do líquido ao longo da coluna para $u_L=0,055\text{m/s}$ e $u_G=0,3467\text{m/s}$

Nas Figuras 5.11 e 5.12 mostram-se os resultados das variações da temperatura na região do líquido. Neste caso, o comportamento das variações é análogo às Figuras 5.5 e 5.6, já obtidas variando a velocidade do gás. A diferença deste caso, é que há maior aquecimento do filme líquido devido ao uso da velocidade máxima do gás na simulação.

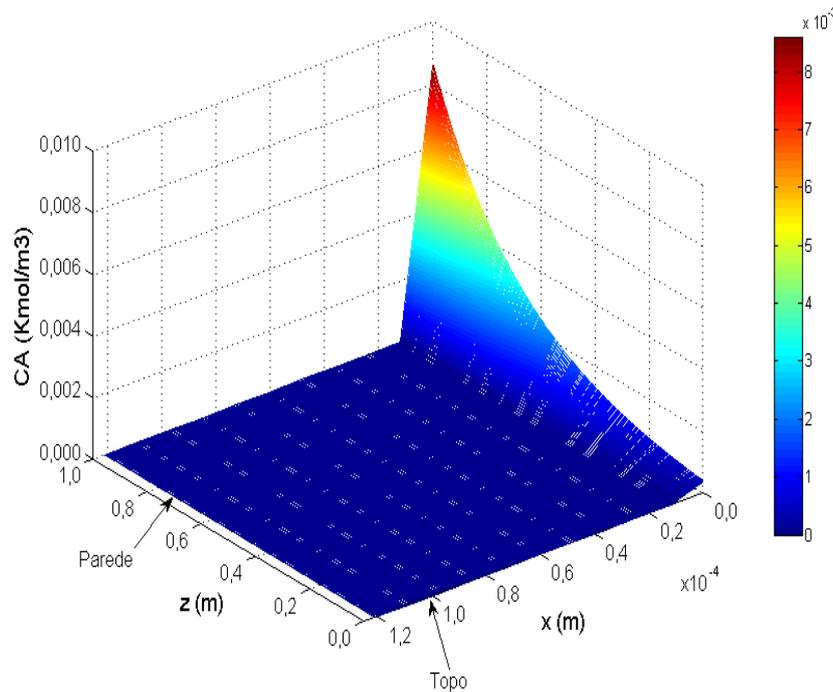


Figura 5.13- Variação da concentração de CO_2 absorvido na região do líquido ao longo da coluna para $u_L=0,02\text{m/s}$ e $u_G=0,3467\text{m/s}$.

Nas Figuras 5.13 e 5.14, são mostrados os resultados do comportamento de CO_2 absorvido em MEA. O comportamento da concentração de CO_2 absorvido é similar ao obtido variando-se a velocidade do gás ilustrado nas Figuras 5.7 e 5.8. Observa-se que no topo da coluna, não há variação brusca da concentração conforme as Figuras 5.13 e 5.14, diferentemente do que ocorre quando se varia a velocidade do gás, mostrado nas Figuras 5.7 e 5.8.

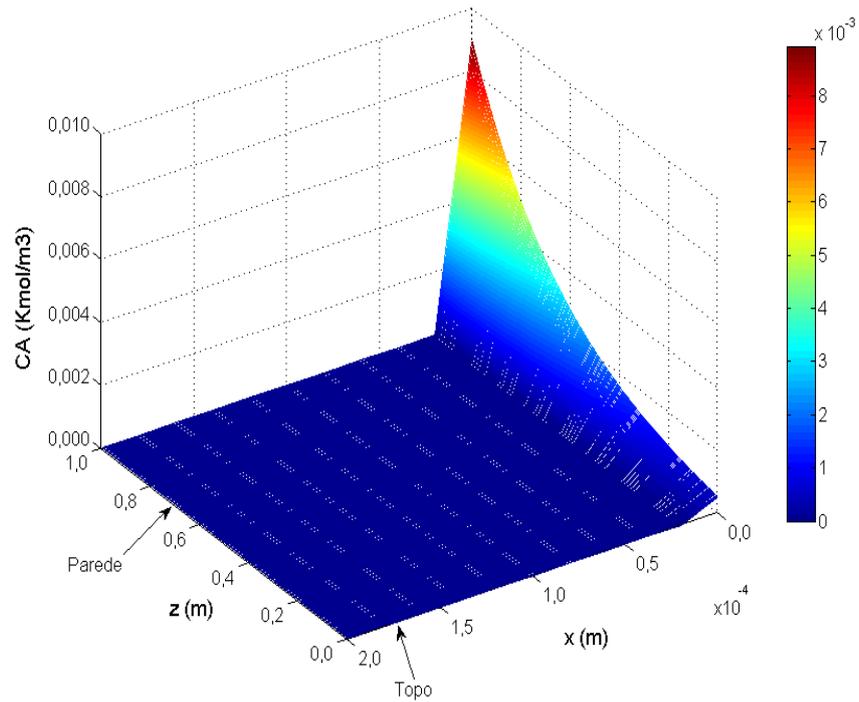


Figura 5.14- Variação da concentração de CO₂ absorvido na região do líquido ao longo da coluna para $u_L=0,055\text{m/s}$ $u_G=0,3467\text{m/s}$

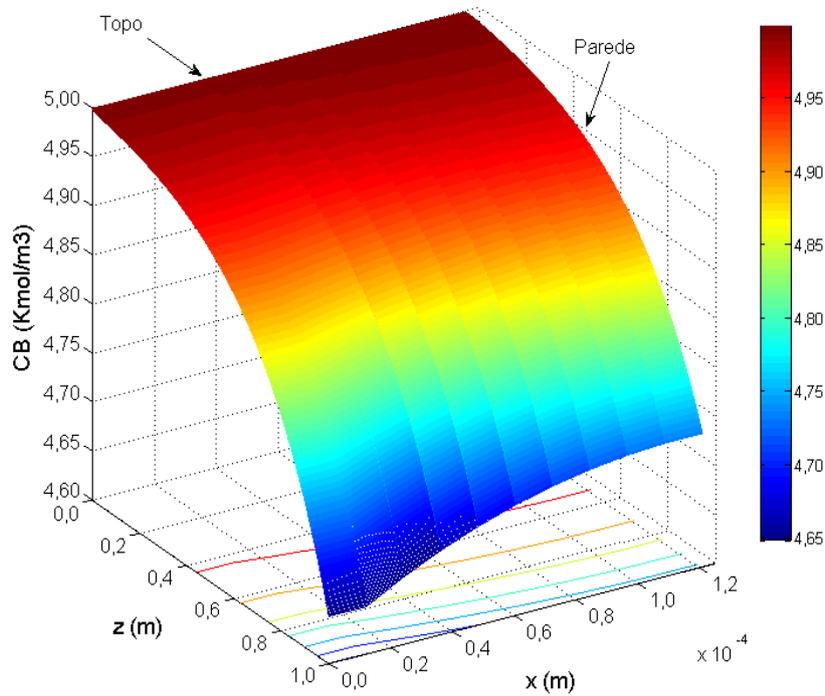


Figura 5.15- Variação da concentração de MEA na região do líquido ao longo da coluna, para $u_L=0,02\text{m/s}$ e $u_G=0,3467\text{m/s}$.

Na Figura 5.15, pode-se observar que, para velocidade de líquido muito baixo, a concentração de MEA decresce de forma quase uniforme em toda a espessura do filme e ao longo da coluna, o que não ocorre quando a velocidade do líquido é aumentada, como mostrado na Figura 5.16. Neste caso, o comportamento do resultado é semelhante aos encontrados nas Figuras 5.9 e 5.10. Dessa forma, variando-se a velocidade do líquido, o comportamento da concentração de MEA varia bruscamente na zona próxima a parede.

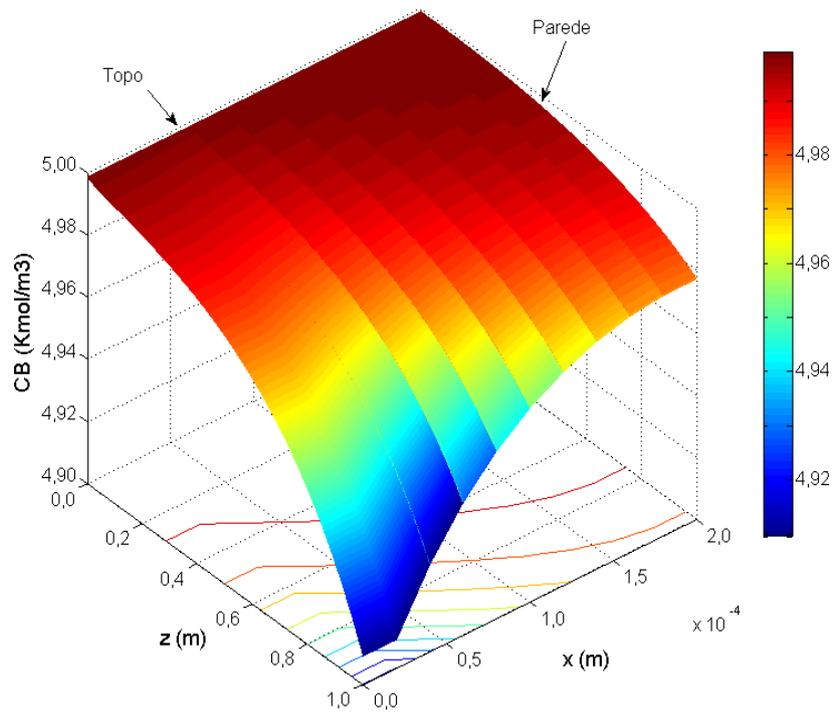


Figura 5.16- Variação de concentração de MEA na região do líquido ao longo da coluna, para $u_L=0,055\text{m/s}$ e $u_G=0,3467\text{m/s}$.

5.6 Perfis da Região de Gás

Na região do gás apresenta-se os perfis da concentração de gás CO_2 , da temperatura de gás e as porcentagens de CO_2 absorvido, simulados para os dois casos. O primeiro variando-se a velocidade do gás, e mantendo-se constante a velocidade do líquido e, em seguida, o segundo caso variando-se a velocidade do líquido e mantendo-se constante a velocidade do gás

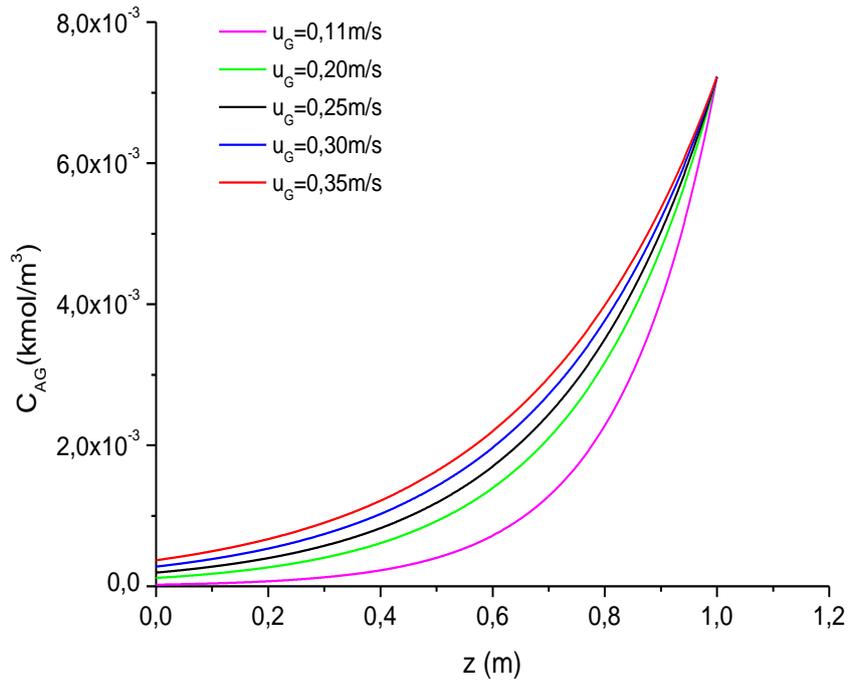


Figura 5.17- Perfis da concentração de CO_2 ao longo da coluna para $u_L = 0,0412 \text{ m/s}$ e variando a velocidade de gás

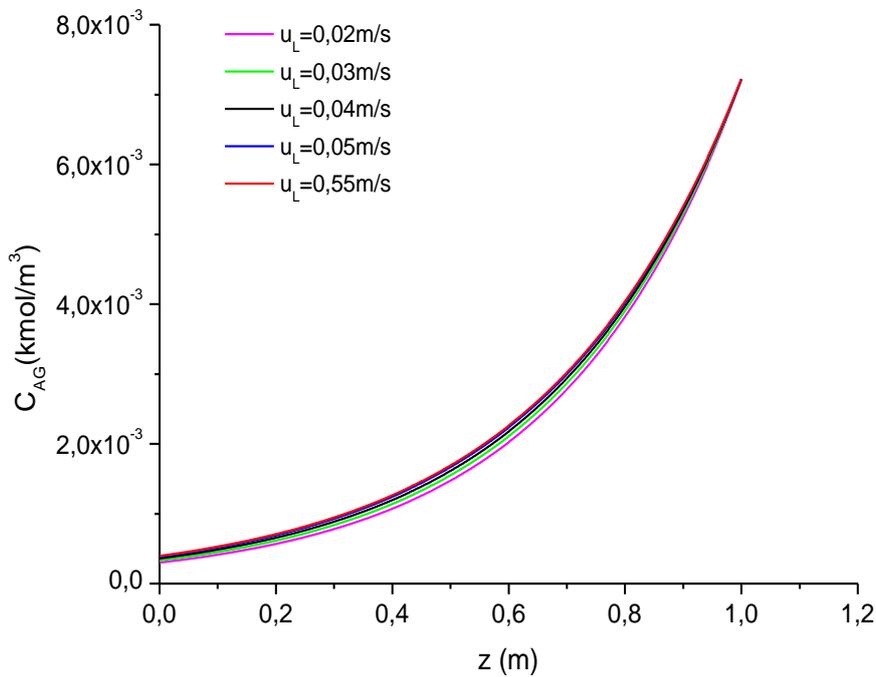


Figura 5.18- Perfis da concentração de CO_2 ao longo da coluna, para $u_g = 0,3467 \text{ m/s}$ e variando a velocidade de líquido.

Nas Figuras 5.17 e 5.18 são apresentados os resultados das variações da concentração de CO_2 na região de gás ao longo da coluna. Os resultados do

primeiro caso, são apresentados na Figura 5.17, mostrando-se os perfis da concentração para diferentes velocidades de gás, observa-se que a concentração começa a diminuir no momento em que o gás entra em contato em contracorrente com a MEA. Conforme se avança na direção “z” a queda da concentração vai se tornando invariável, especialmente próximo ao topo da coluna. Nas curvas mostradas, mantêm-se a velocidade de líquido constante e varia-se a velocidade de gás para cada curva. Para a menor velocidade de gás, obtém-se a maior queda da concentração, enquanto para a maior velocidade de gás tem-se a menor queda. Dessas curvas obteve-se a maior taxa de transferência de massa de CO₂ de $1,1545 \times 10^{-5}$ kg/s para velocidade do gás ($u_G=0,035$ m/s) e a menor taxa de $5,102 \times 10^{-6}$ kg/s para velocidade de gás ($u_G=0,11$ m/s).

Os resultados do segundo caso da simulação são apresentados na Figura 5.18. O comportamento é semelhante entre as curvas, o que não ocorre na simulação do primeiro caso. A variação da taxa de transferência de massa é menor quando comparando com o primeiro, uma vez que a taxa de transferência de massa é da ordem de $1,50 \times 10^{-5}$ kg/s.

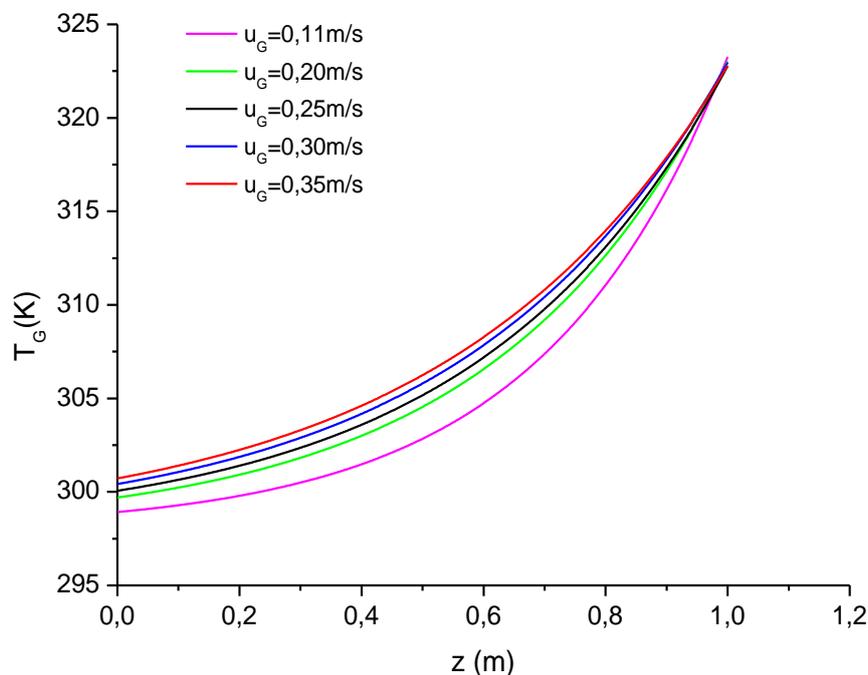


Figura 5.19- Perfis da temperatura na região do gás ao longo da coluna, para $u_L=0,0412$ m/s e variando a velocidade de gás.

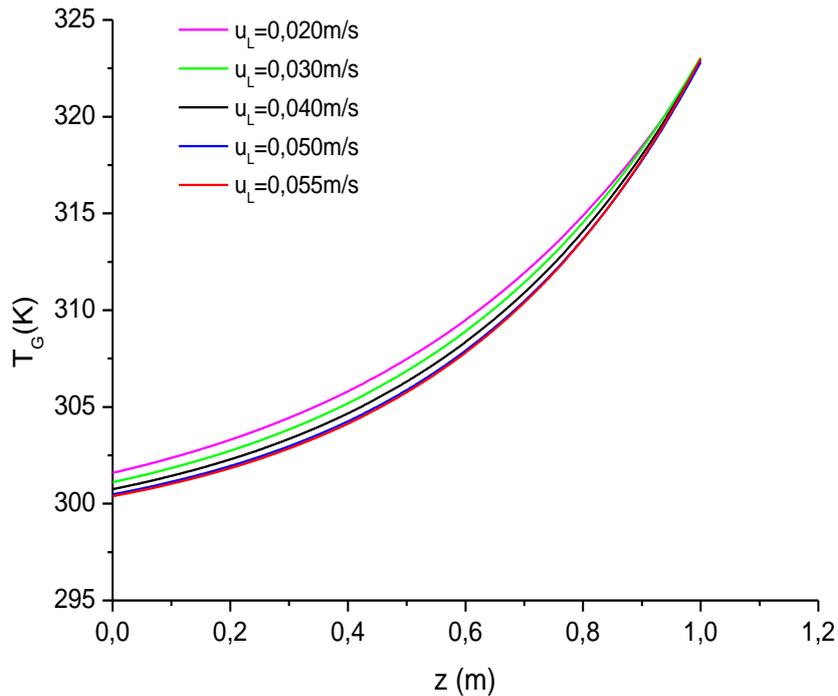


Figura 5.20- Perfis da temperatura na região do gás ao longo da coluna, para $u_G=0,3467\text{m/s}$ e variando a velocidade de líquido.

Nas Figuras 5.19 e 5.20 são apresentadas as variações da temperatura de CO_2 na região do gás ao longo da coluna. Na primeira Figura é evidenciada a influencia da variação da velocidade de gás nos perfis da temperatura. Para a menor velocidade de gás, há maior troca de calor entre a região de gás e a região de líquido, e para a maior velocidade de gás ocorre o contrário

Na Figura 5.20 tem-se a influencia da variação da velocidade de líquido nos perfis da temperatura. Conforme se aumenta a velocidade de líquido resfriamos mais o a corrente gasosa.

Na Tabela 5.1 encontram-se as porcentagens de CO_2 absorvido nos dois casos de estudo, calculados pelas concentrações de CO_2 no fundo e no topo da coluna.

Tabela 5.3- Porcentagens de CO_2 absorvido

%CO ₂ Absorvido para $u_L=0,0412$ m/s (caso primeiro)				
$u_G=0,11$ m/s	$u_G=0,20$ m/s	$u_G=0,25$ m/s	$u_G=0,30$ m/s	$u_G=0,35$ m/s
99,69	98,36	97,31	96,13	94,88
%CO ₂ Absorvido para $u_G=0,3467$ m/s (caso segundo)				
$u_L=0,020$ m/s	$u_L=0,030$ m/s	$u_L=0,040$ m/s	$u_L=0,050$ m/s	$u_L=0,055$ m/s
95,82	95,39	95,01	94,67	94,51