

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Obtenção de valores de emitância de vapor de água e dióxido de carbono através do
modelo de soma-ponderada-dos-gases-cinza

por

Juliano Tonin

Monografia apresentada ao Departamento
de Engenharia Mecânica da Escola de
Engenharia da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como parte dos requisitos
para obtenção do diploma de Engenheiro
Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2014



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

OBTENÇÃO DE VALORES DE EMITÂNCIA DE VAPOR DE ÁGUA E DIÓXIDO DE CARBONO ATRAVÉS DO MODELO DE SOMA-PONDERADA-DOS-GASES-CINZA

por

Juliano Tonin

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Francis H. R. França

Comissão de Avaliação:

Profa. Dra. Leticia J. Rodrigues

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, 28 de novembro de 2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Francis H. R. França, pela dedicação e cordialidade prestados na orientação deste trabalho.

Aos meus pais, por todo o suporte e paciência durante minha jornada de formação tanto acadêmica quanto pessoal.

À minha namorada, Ana Valéria que sempre me apoiou em todas as escolhas e me confortou nos momentos difíceis.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por me proporcionar experiências e conhecimentos que levarei como bagagem para vida.

Tonin, J. **Obtenção de valores de emitância de vapor de água e dióxido de carbono através do modelo de soma-ponderada-dos-gases-cinza**. 2014. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia para cálculo de emitância de misturas gasosas de vapor de água e dióxido de carbono através de coeficientes gerados pelo modelo da soma-ponderada-dos-gases-cinza (WSGG) com uso de dados espectrais obtidos no HITEMP 2010. A metodologia baseia-se na sobreposição de coeficientes proposto por Cassol *et al.* 2014, que sugere um conjunto de combinações entre os coeficientes de ponderação e absorção de espécies computados separadamente, permitindo a geração de correlações de misturas com razões molares variáveis. Os resultados de emitância obtidos demonstram boa concordância quando comparados à literatura, com erros máximos de aproximadamente 8% e erros médios de até 6% para razões de mistura $p_w/p_c = 1/1$ e $2/1$. Os termos de correção da emissividade obtidos revelaram a baixa influência da razão de mistura em temperaturas elevadas. Contudo, os resultados reforçam a praticidade na aplicação do método que, com baixo custo computacional, permite a obtenção de coeficientes atualizados para a resolução de problemas práticos de engenharia em que a radiação térmica é o fenômeno predominante na transferência de calor.

PALAVRAS-CHAVE: Soma-ponderada-dos-gases-cinzas; sobreposição de coeficientes; termos de correção da emissividade.

Tonin, J. **Obtainment of Emittance values for water vapor and carbon dioxide through the Weighted-Sum-of-Gray-Gas model.** 2014. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

This paper proposes a methodology for calculating emittance of gaseous mixtures of water vapor and carbon dioxide through coefficients generated by the weighted-sum-of-grey gases model (WSGG) using spectral data obtained in HITEMP 2010. The methodology is based on the overlap of coefficients proposed by Cassol *et al.* 2014, which suggests a set of combinations between the weighting and absorption coefficients of species computed separately, allowing the generation of mixtures correlations with varying molar ratios. The results of emittance obtained show good agreement when compared to literature, with maximum errors of approximately 8% and average errors until 6% for mixture ratio $p_w/p_c = 1/1$ e $2/1$. The emissivity correction terms obtained revealed low influence of mixing ratio in high temperatures. However, the results reinforce the practicality in the method applying, with low computational cost, allows to obtaining updated coefficients for solving practical problems in engineering where thermal radiation is the predominant phenomenon on heat transfer.

KEYWORDS: Weighted-sum-of-gray-gases; overlapping of coefficients; emissivity correction terms.

LISTA DE SÍMBOLOS

a_χ	coeficiente de ponderação WSGG de uma espécie χ , adimensional
a_m	coeficiente de ponderação WSGG de uma mistura, adimensional
a_w	coeficiente de ponderação WSGG da H_2O , adimensional
a_c	coeficiente de ponderação WSGG do CO_2 , adimensional
$\kappa_{p\chi}$	coeficiente de absorção de pressão $m^{-1} \cdot atm^{-1}$
κ_m	coeficiente de absorção da mistura, m^{-1}
κ_χ	coeficiente de absorção de uma espécie χ , m^{-1}
$b_{w,0}$	coeficientes polinomiais WSGG da H_2O , adimensional
$b_{w,1}$	coeficientes polinomiais WSGG da H_2O , K^{-1}
$b_{w,2}$	coeficientes polinomiais WSGG da H_2O , K^{-2}
$b_{w,3}$	coeficientes polinomiais WSGG da H_2O , K^{-3}
$b_{w,4}$	coeficientes polinomiais WSGG da H_2O , K^{-4}
$b_{c,0}$	coeficientes polinomiais WSGG do CO_2 , adimensional
$b_{c,1}$	coeficientes polinomiais WSGG do CO_2 , K^{-1}
$b_{c,2}$	coeficientes polinomiais WSGG do CO_2 , K^{-2}
$b_{c,3}$	coeficientes polinomiais WSGG do CO_2 , K^{-3}
$b_{c,4}$	coeficientes polinomiais WSGG do CO_2 , K^{-4}
δ_{max}	maior erro obtido na comparação do método proposto com WSGG _{Dorigon,2012} , %
δ_{avg}	erro médio obtido na comparação do método proposto com WSGG _{Dorigon,2012} , %
$I_{\eta b}$	intensidade de radiação espectral emitido pelo corpo negro, $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$
p_w	pressão parcial de H_2O , atm
p_c	pressão parcial de CO_2 , atm
$p_a S$	parâmetro pressão distância, atm·m
p	pressão total, atm
p_a	pressão parcial do H_2O e CO_2 , atm
T	temperatura, K
S	parâmetro de tamanho, m
J_m	Índice da mistura calculado pelo método da sobreposição, adimensional
i_w	Número de gases cinzas representativos da H_2O , adimensional
i_c	Número de gases cinzas representativos do CO_2 , adimensional
Y_w	Fração molar da H_2O , %
Y_c	Fração molar da H_2O , %

SÍMBOLOS GREGOS

ε_χ	emitância total de uma espécie χ , adimensional
ε_m	emitância total da mistura, adimensional
ε_w	emitância total da H ₂ O, adimensional
ε_c	emitância total do CO ₂ , adimensional
$\Delta\varepsilon$	Termo de correção da emitância da mistura, adimensional
$\Delta\eta_i$	Largura da banda do i-ésimo gás cinza, cm^{-1}

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4.1 O Modelo WSGG	2
4.2 Mistura de Dois Gases Cinzas	5
5. METODOLOGIA	6
5.1 Técnica da Solução.....	6
5.1.1 Coeficientes WSGG	6
5.1.2 Obtenção dos Coeficientes de Ponderação para Vapor de Água e Dióxido de Carbono	7
5.1.3 Índice da Mistura.....	8
5.1.4 Obtenção dos Coeficientes de Ponderação e Absorção da Mistura	8
5.1.5 Cálculo da Emitância	9
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
6.1 Análise da Emitância Gerada pelo Método da Sobreposição	10
6.2 Termos de correção da mistura.....	12
7. CONCLUSÃO	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE I – Emitâncias geradas para demais razões de mistura	16
APÊNDICE II – Emitâncias geradas para espécies separadamente	18

1. INTRODUÇÃO

A queima de combustíveis fósseis representa uma parcela considerável entre as fontes geradoras de energia mecânica, térmica e elétrica. A crescente preocupação com questões ambientais, bem como as restrições mundiais impostas às taxas de emissão de gases gerados nos processos de combustão, orientam estudos na busca do melhor aproveitamento energético e no desenvolvimento de equipamentos com maior eficiência de queima [Duciak, 2013].

A radiação térmica é o principal mecanismo de transferência de calor no processo de combustão. Por estar relacionada diretamente com as altas temperaturas e com a capacidade de emissão e absorção dos gases envolvidos no processo, a análise das trocas radiantes dos gases produzidos na queima de óleos combustíveis e metano necessitam de correlações atualizadas para obtenção das emissâncias de gases participantes como o vapor de água e dióxido de carbono através de modelos espectrais [Dorigon, 2012].

O modelo da soma-ponderada-dos-gases-cinza (WSGG) é um método que não envolve dados espectrais detalhados, uma vantagem quando comparado aos demais devido à necessidade de baixo tempo computacional em sua modelagem. Apesar do modelo apresentar a limitação de considerar apenas razões de mistura fixas, sua implementação tem garantido boa coerência nos resultados [Cassol, 2013].

O uso de correlações geradas individualmente para espécies de vapor de água e dióxido de carbono através do modelo WSGG permitem aplicar ferramentas de combinação de gases cinzas com diferentes razões molares. O uso destas técnicas permite a obtenção de valores de emissância consistentes que serão apresentados na forma gráfica, facilitando a resolução de problemas de transferência de calor, como em fornos, câmaras de combustão de motores, entre outros.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é atualizar resultados clássicos de emissância de vapor de água e dióxido de carbono a partir de correlações do modelo da soma-ponderada-de-gases-cinzas geradas a partir de bancos atualizados de linhas espectrais de gases participantes (HITEMP2010).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O modelo da soma-ponderada-dos-gases-cinza (WSGG) proposto por Hottel e Sarofim, 1967, determina que a representação espectral do meio participante seja realizada através de poucas bandas, com coeficiente de absorção uniforme e cada uma delas correspondendo a um gás cinza. A não exigência de dados espectrais detalhados é um dos fatores consideráveis na implementação do método que, ao ser aprimorado por Modest, 1991, não apenas comprovou sua versatilidade no cálculo da equação do transporte radiante, mas também orientou o estudo de novas correlações que acompanhassem o desenvolvimento dos bancos de dados espectrais.

Smith *et al.*, 1982, foram pioneiros na obtenção de funções de ponderação e coeficientes de absorção para misturas gasosas de vapor de água, dióxido de carbono e nitrogênio. Bancos de dados espectrais atualizados como HITEMP 2010, proposto por Rothman *et al.*, 2010, permitiram a obtenção de correlações fidedignas dada a faixa de temperatura de aplicação ser mais condizente com processos de combustão, com temperaturas que superam os 1000K. Autores como Dorigon *et al.*, 2013, propuseram coeficientes para misturas de CO_2 e H_2O em razões de 2/1 e 1/1, que obtiveram boa acurácia nos resultados computados pelo modelo da soma ponderada dos gases cinzas quando comparados aos obtidos pelo método *benchmark* de integração linha-por-linha. Contudo, a impossibilidade de variar as razões das pressões parciais dos gases depois de geradas as correlações aprofundou o estudo de técnicas que permitissem a separação das correlações para os gases.

A metodologia de sobreposição de coeficientes proposta por Cassol *et al.*, 2014, apresentou correlações gerados através do modelo WSGG para espécies de CO_2 e H_2O computadas separadamente. Assim, analisada como alternativa confiável no desenvolvimento de valores de emitância, a combinação das propriedades de misturas com pressões parciais de razões não constantes permitiu que valores de emitância e termos de correção clássicos, como os propostos por Hottel, 1954, fossem atualizados.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 O Modelo WSGG

Proposto por Hottel e Sarofim, 1967, modelo da soma-ponderada-de-gases-cinzas (WSGG) apresenta uma alternativa simplificada para a integração das propriedades do espectro, pois as regiões são divididas de modo que o coeficiente de absorção por unidade de pressão torna-se uniforme, acrescido de janelas transparentes. A Figura 4.1 representa o

coeficiente de absorção por unidade de pressão $\kappa_{p,i}$ de um meio participante χ , formado por i gases cinzas e janelas transparentes.

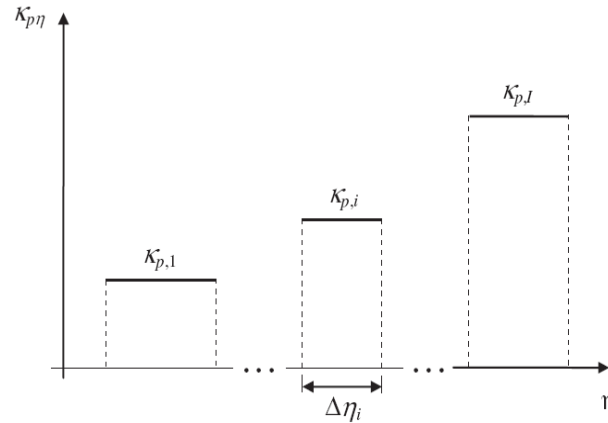


Figura 4.1 – Representação do coeficiente de absorção de pressão com o modelo WSGG utilizando i gases cinzas [Dorigon *et al.*, 2013].

Assume-se que o i -ésimo gás cinza cobre uma porção fixa $\Delta\eta_i$ no espectro não contínuo e que há uma relação de independência do coeficiente de absorção de pressão da temperatura T e da pressão parcial p_χ das espécies participantes. Com base nessas definições, Siegel e Howell, 2002, propuseram que a emitância total para um meio isotérmico e homogêneo χ ao longo de um dado caminho S , em metros, pode ser expresso por:

$$\varepsilon_\chi(T, p_a S) = \frac{\int_{\eta=0}^{\infty} I_{\eta b}(\eta, T) [1 - \exp(-\kappa_{p\chi, \eta} p_a S)] d\eta}{\sigma T^4 / \pi} \quad (4.1)$$

na qual

$p_a S$ = Parâmetro pressão-distância, $atm \cdot m$

$\kappa_{p\chi, \eta}$ = Coeficiente de absorção de pressão espectral de uma dada espécie χ de gás, $m^{-1} \cdot atm^{-1}$

$I_{\eta b}$ = Intensidade espectral de radiação de corpo negro (dada pela distribuição de Planck), $W/(m^2 cm^{-1})$

T = Temperatura local do gás cinza, *Kelvin*

Integrando a Equação (4.1) no espectro, utilizando o modelo da soma-pondera-dos-gases-cinzas, chega-se à formulação da emitância total:

$$\varepsilon_{\chi}(T, p_a S) = \sum_{i=1}^{i_{\chi}} a_{\chi,i}(T) [1 - \exp(-\kappa_{p\chi,i} p_a S)] \quad (4.2)$$

na qual

$\kappa_{p\chi,i}$ = Coeficiente de absorção de pressão do i -ésimo gás cinza, $atm \cdot m^{-1}$

$a_{\chi,i}$ = Coeficiente de ponderação (termo dependente da temperatura do i -ésimo gás cinza), *adimensional*.

O coeficiente de ponderação é a representação física da fração de energia de um corpo negro na região do espectro associado ao coeficiente de absorção de pressão do gás cinza. Este coeficiente é obtido através do *fitting* dos dados de emitância para cada gás cinza, computados pela integração Linha-por-Linha (LBL) a partir dos dados obtidos do HITEMP 2010 com uso da Equação (4.2). Smith *et al.*, 1983, propôs a representação dos coeficientes de ponderação através do polinômio da seguinte forma:

$$a_{\chi,i}(T) = \sum_{k=1}^{i_{\chi}} b_{\chi,i,k} T^{k-1} \quad (4.3)$$

na qual $b_{\chi,i,k}$ são os k -ésimos coeficientes polinomiais correspondentes aos i -ésimos gases cinzas. Porém, no modelo WSGG, as janelas transparentes devem ser consideradas com o coeficiente de absorção nulo, ou seja, $\kappa_0 = 0$. Aplicando o princípio de conservação de energia para as janelas transparentes, $a_{\chi,0}(T)$, os coeficientes de temperatura obedecem à relação:

$$\sum_{i=0}^{i_{\chi}} a_{\chi,i}(T) = 1 \quad (4.4)$$

$$a_{\chi,0}(T) = 1 - \sum_{i=1}^{i_{\chi}} a_{\chi,i}(T) \quad (4.5)$$

A análise abordada neste trabalho compreende a utilização de gases gerados na combustão de óleos combustíveis e metano, tais como vapor de água e dióxido de carbono. Proposições para determinação da emitância de espécies analisadas individualmente foram apresentadas na forma de gráficos por Hottel, 1954. A utilização dos dados propostos graficamente sugere que emitância de um gás composto por duas espécies distintas é expressa por:

$$\varepsilon_m(T, p_a S) = \varepsilon_w(T, Y_w p_a S) + \varepsilon_c(T, Y_c p_a S) - \Delta\varepsilon \quad (4.6)$$

na qual

- ε_m = Emitância da mistura de gases composta por duas espécies, *adimensional*
 ε_w = Emitância do vapor de água na composição da mistura, *adimensional*
 ε_c = Emitância do dióxido de carbono na composição da mistura, *adimensional*
 $\Delta\varepsilon$ = Termo de correção da emissividade da mistura, *adimensional*

O termo de correção é aplicado visando corrigir diferenças inerentes ao *overlapping* da mistura de gases. As espécies que compõem o gás formado na mistura são apresentadas individualmente, com a pressão total mantida constante e, seus parâmetros pressão-distância corrigidos através da razão molar de cada espécie considerada.

4.2 Mistura de Dois Gases Cinzas

Uma desvantagem apontada por diversos autores quanto ao uso do modelo WSGG convencional é que sua aplicação é limitada a razões fixas de mistura. Cassol, 2013, explica que a principal dificuldade em combinar correlações WSGG de espécies diferentes é que não existe uma relação clara entre os coeficientes de gases cinzas e a sua posição no espectro. No entanto, em situações em que se deseja combinar os coeficientes gerados para uma única espécie química através do modelo da soma-ponderada-dos-gases-cinzas, os autores propuseram a abordagem combinatória através da sobreposição dos coeficientes. A ferramenta tem fundamentação física na hipótese de que o coeficiente de ponderação seja interpretado como a probabilidade de que a energia do corpo negro seja emitida no espectro onde existe o coeficiente de absorção. A representação matemática é mostrada abaixo:

$$\kappa_{m,j_m}(T) = \kappa_{\chi_1,i}(T) + \kappa_{\chi_1,j}(T) \quad (4.7)$$

Os coeficientes de absorção de duas espécies distintas, κ_{χ_1} e κ_{χ_2} em $(atm \cdot m)^{-1}$, compõem o coeficiente de absorção da mistura κ_m , corrigidos de acordo com a relação molar da pressão parcial das espécies que compõem o gás cinza na forma p_{χ_1}/p_{χ_2} . No entanto, nos coeficientes de ponderação da mistura a_m , computados para duas espécies distintas, a relação combinatória é ditada através do produto das espécies:

$$a_{m,j_m}(T) = a_{\chi_1,i}(T) \times a_{\chi_2,j}(T) \quad (4.8)$$

Da equação acima, $a_{\chi 1}$ e $a_{\chi 2}$ são os coeficientes de ponderação das espécies consideradas, obtidas através do modelo da soma-ponderada-dos-gases-cinzas.

5. METODOLOGIA

5.1 Técnica da Solução

5.1.1 Coeficientes WSGG

A utilização de coeficientes gerados a partir de um banco de dados espectrais atualizado, que representasse da melhor forma as condições físicas de interesse neste trabalho, é de suma importância para a coerência no cálculo dos valores de emitância para análise gráfica. Cassol *et al.*, 2014, fez uso do banco de dados HITEMP 2010 na obtenção de coeficientes polinomiais $b_{\chi,i,k}$ e de absorção de pressão $\kappa_{p\chi,i}$, para o vapor de água e dióxido de carbono computados individualmente. A Tabela 5.1 mostra os coeficientes obtidos para moléculas de vapor d' água-H₂O para quatro gases cinzas.

Tabela 5.1 - Coeficientes WSGG de H₂O ($\chi = w$), com quatro gases cinzas
[Cassol *et al.*, 2014].

i_w	$\kappa_{pw,i} (atm \cdot m)^{-1}$	$b_{w,i,0}$	$b_{w,i,1}(K^{-1})$	$b_{w,i,2}(K^{-2})$	$b_{w,i,3}(K^{-3})$	$b_{w,i,4}(K^{-4})$
1	1,71E-01	6,62E-02	5,55E-04	-4,84E-07	2,23E-10	-4,02E-14
2	1,55E+00	1,10E-01	5,76E-06	2,40E-07	-1,70E-10	3,10E-14
3	5,56E+00	-4,92E-02	7,06E-04	-7,01E-07	2,61E-10	-3,49E-14
4	4,92E+01	2,37E-01	-1,89E-04	-9,07E-09	4,08E-11	-8,78E-15

Para a composição da mistura, os coeficientes obtidos com uso do modelo WSGG para o dióxido de carbono-CO₂ são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Coeficientes WSGG de CO₂ ($\chi = c$), com quatro gases cinzas.
[Cassol *et al.*, 2014].

i_c	$\kappa_{pc,i} (atm \cdot m)^{-1}$	$b_{c,i,0}$	$b_{c,i,1}(K^{-1})$	$b_{c,i,2}(K^{-2})$	$b_{c,i,3}(K^{-3})$	$b_{c,i,4}(K^{-4})$
1	1,38E-01	9,99E-02	6,44E-04	-8,69E-07	4,13E-10	-6,77E-14
2	1,90E+00	9,42E-03	1,04E-04	-2,28E-08	-2,13E-11	6,50E-15
3	1,33E+01	1,45E-01	-3,07E-04	3,77E-07	-1,84E-10	3,02E-14
4	3,41E+02	-2,92E-02	2,52E-04	-2,61E-07	9,97E-11	-1,33E-14

Os dados gerados para as espécies analisadas são válidos para uma faixa de temperaturas de 400 K a 2500 K e um parâmetro pressão-distância de 0,001 atm.m até 10 atm.m. O desenvolvimento de funções com índice incremental e diferentes parâmetros de entrada foi realizado ao longo de todas etapas deste trabalho. Para organizar os conjuntos de valores obtidos através das equações propostas, optou-se pelo software *Microsoft Excel*, que atende às exigências algébricas do modelo de forma satisfatória.

5.1.2 Obtenção dos Coeficientes de Ponderação para Vapor de Água e Dióxido de Carbono

A definição do coeficiente de ponderação remete à relação de dependência deste à temperatura local do gás cinza. Com isso, o intervalo de temperaturas válidas para os coeficientes propostos por Cassol *et al.*, 2014, foi dividido em sub intervalos crescentes com $\Delta T = 100K$, delimitando a variável da temperatura local T em 22 valores constantes.

O número de coeficientes dependentes da temperatura é proporcional à quantidade de gases cinzas representativos de cada espécie. Portanto, para o caso estudado em que $i_w = i_c = 4$, ao computar separadamente os coeficientes do vapor de água a_w , e dióxido de carbono a_c , expandiu-se a Equação (4.3) na forma polinomial:

$$a_{w,i}(T) = (b_{w,i,0}T^0) + (b_{w,i,1}T^1) + (b_{w,i,2}T^2) + (b_{w,i,3}T^3) + (b_{w,i,4}T^4) \quad (5.1)$$

$$a_{c,i}(T) = (b_{c,i,0}T^0) + (b_{c,i,1}T^1) + (b_{c,i,2}T^2) + (b_{c,i,3}T^3) + (b_{c,i,4}T^4) \quad (5.2)$$

na qual T é a temperatura local do gás cinza e $b_{w,i}$ e $b_{c,i}$ os coeficientes polinomiais obtidos nas Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente. No entanto, o coeficiente de ponderação das janelas transparentes não pode ser negligenciado, sendo necessário aplicar a Equação (4.5) para

obter os valores $a_{w,0}$ e $a_{c,0}$ para cada variável de temperatura local, totalizando 110 coeficientes de ponderação por espécie.

5.1.3 Índice da Mistura

A metodologia da sobreposição aplicada neste estudo define que, para obter os coeficientes de ponderação a_m e absorção $\kappa_{w,i}$ de uma mistura composta por dois gases cinzas, é necessário correlacionar os coeficientes de cada espécie separadamente, de forma a combiná-los respeitando a temperatura local em que foram obtidos. Logo, o índice J_m é calculado de modo a abranger o número de i -gases cinza da composição de cada espécie, conforme a equação:

$$J_m = (i_w + 1)(i_c + 1) \quad (5.3)$$

onde i_w e i_c representam o número de gases cinzas representativos das espécies de vapor de água e dióxido de carbono. Como ambas espécies são constituídas por quatro gases cinzas, a equação acima permite inferir que serão necessárias 25 combinações entre cada coeficiente.

5.1.4 Obtenção dos Coeficientes de Ponderação e Absorção da Mistura

Os coeficientes de ponderação da mistura foram computados com uso da Equação (4.8) que estabelece o produto das espécies de vapor de água, $a_{w,i}$, e do dióxido de carbono, $a_{c,i}$, de modo a combiná-los respeitando as variáveis da temperatura local. Portanto, para o índice de mistura definido por $J_m = 25$ e os 22 valores de temperatura local considerados, obteve-se um total de 550 coeficientes de ponderação.

Uma das particularidades do método da sobreposição tange a relação dos coeficientes de absorção da mistura com a razão molar atribuída às espécies de gases cinzas. Visando avaliar a influência de razões de mistura não constantes nos valores de emitância, este trabalho considerou na composição das mistura de vapor de água e dióxido de carbono diferentes razões p_w/p_c . A Equação (4.7) aplicada ao índice de mistura J_m é escrita com intuito de formar a soma combinada dos coeficientes de absorção do vapor de água ($\kappa_{w,i}$) e do dióxido de carbono ($\kappa_{c,i}$) para cada temperatura local:

$$\kappa_{m,25}(T) = p_w \kappa_{p,w,i}(T) + p_c \kappa_{p,c,i}(T) \quad (5.4)$$

onde os coeficientes de absorção de pressão do vapor de água ($\kappa_{p,w,i}$) e do dióxido de carbono ($\kappa_{p,c,i}$) com índices $i = 1, 2, 3$ e 4 , foram obtidos das Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente. As pressões parciais do vapor de água, p_w , e do dióxido de carbono, p_c , foram ajustadas com os valores analisados de p_w/p_c por meio das equações mostradas abaixo:

$$p_w = p Y_w \quad (5.5)$$

$$p_c = p Y_c \quad (5.6)$$

nas quais Y_w e Y_c as frações molares das espécies e $p = p_w + p_c$ a pressão total da mistura em *atm*. Por fim, as janelas transparentes ($\kappa_{w,0} = 0$ e $\kappa_{c,0} = 0$) foram acrescidas aos coeficientes de absorção da mistura das espécies.

5.1.5 Cálculo da Emitância

O cálculo de emitância da mistura ε_m foi obtido através do somatório dos conjuntos de valores dos coeficientes de ponderação e absorção das misturas calculadas pelo método de sobreposição, nas respectivas temperaturas locais e nos parâmetros pressão-distância. Para efeitos de comparação e conseqüente validação dos resultados, visando privilegiar uma análise gráfica ampla, foram estabelecidos parâmetros pressão-distância $p_a S$ com valores de 10; 1,0; 0,1 e 0,01 [*atm* · *m*]. A pressão total p_a foi mantida em 1 *atm*, valor típico ao utilizado em cálculos que envolvem câmaras de combustão. O uso da Equação (4.2), adaptada por Cassol, 2013, permite computar as emitâncias da mistura conforme:

$$\varepsilon_m(T, p_a S) = \sum_{i=1}^{i=25} a_{m,i}(T) [1 - e^{-\kappa_{m,i} p_a S}] \quad (5.7)$$

na qual a_m e κ_m são os coeficientes das misturas obtidos através das etapas descritas nos procedimentos anteriormente apresentados nesta seção.

Por fim, a obtenção dos novos termos de correção $\Delta\varepsilon$ com uso da Equação (4.6) exigiu que as emissividades da mistura calculadas com o procedimento de sobreposição fossem comparadas aos valores de emitância gerados para as espécies de vapor de água ε_w e dióxido de carbono ε_c .

A principal diferença na abordagem de espécies obtidas separadamente abrange os coeficientes de absorção por unidade de pressão. Tanto os coeficientes de ponderação,

quanto os de absorção de pressão mostrados nas Tabelas 5.1 e 5.2, foram empregados diretamente na Equação (4.2), de acordo com a espécie considerada:

$$\varepsilon_w(T, p_a S) = \sum_{i=1}^{i=4} a_{w,i}(T) [1 - \exp(-\kappa_{pw,i}(p_a S)_w)] \quad (5.8)$$

$$\varepsilon_c(T, p_a S) = \sum_{i=1}^{i=4} a_{c,i}(T) [1 - \exp(-\kappa_{pc,i}(p_a S)_c)] \quad (5.9)$$

Portanto, os ajustes de razão de mistura ditados pela relação p_w/p_c empregados no cálculo da emitância do vapor de água (5.8) e o dióxido de carbono (5.9) ocorrem através do produto destes pelos parâmetros pressão-distância, onde:

$$(p_a S)_w = (p_w/p_c) p_a S \quad (5.10)$$

$$(p_a S)_c = (1 - p_w/p_c) p_a S \quad (5.11)$$

Na obtenção de valores que permitissem a comparação direta com os resultados gerados pelo método da sobreposição, as emitâncias das espécies foram computadas de modo a manter constante a pressão total em $p_a = 1 \text{ atm}$ e o caminho S variando em 10; 1,0; 0,1 e 0,01 metros.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise da Emitância Gerada pelo Método da Sobreposição

O principal objetivo desse estudo consistiu em obter resultados de emitância a partir de correlações geradas pelo modelo da soma-ponderada-dos-gases-cinza para misturas com diferentes razões de mistura. Tais resultados podem auxiliar de forma significativa na resolução de problemas de transferência de calor na engenharia.

Os resultados obtidos pelo método da sobreposição foram validados através da comparação com os valores das emitâncias obtidas por Dorigon, 2012. As emitâncias obtidas pelo autor foram computadas com razões fixas de mistura através do modelo WSGG aplicado ao banco de dados espectrais do HITEMP 2010. O comportamento da emissividade (ε) é mostrado na Figura 6.1, calculado para os quatro parâmetros pressão-distância ($p_a S$) e razões de mistura $p_w/p_c = 1/1$ e $2/1$. A inspeção gráfica dos valores de emitância em função da variação de temperatura revela similaridades ao comportamento apresentado por Dorigon *et al.*, 2013, onde os maiores desvios nas emissividades

computadas foram constatados nos parâmetros pressão-distância de maior magnitude. Os gráficos das emitâncias obtidas para as demais razões de mistura p_w/p_c são apresentadas no Apêndice I.

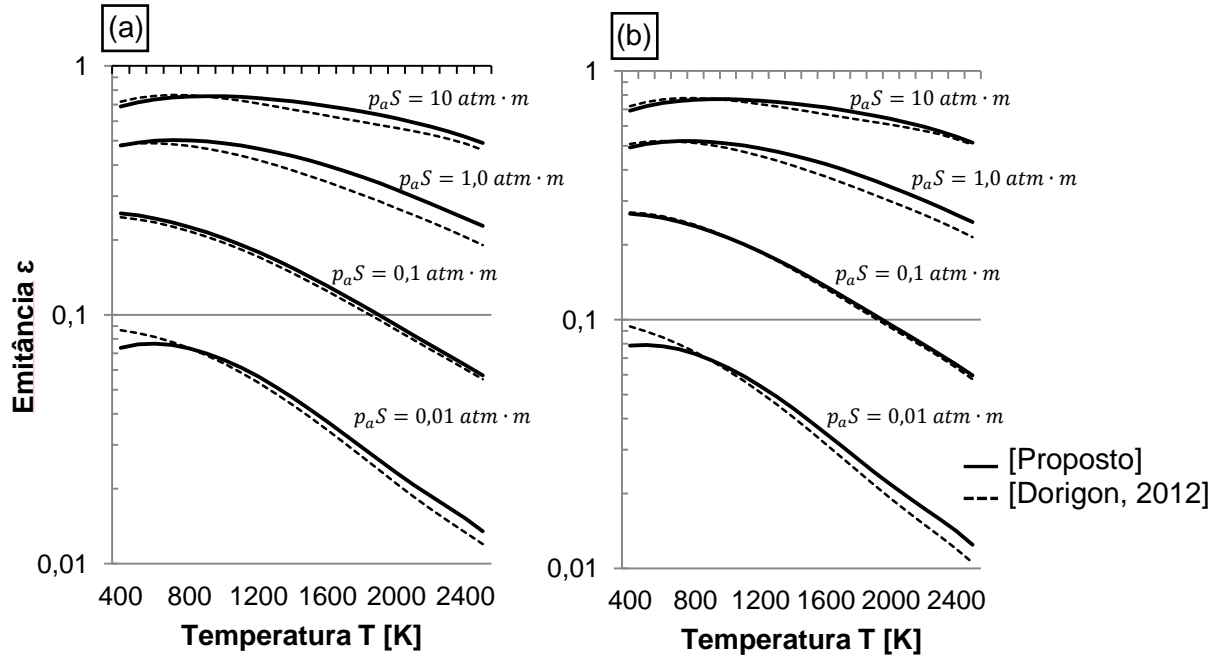


Figura 6.1 – Comparação entre a emitância obtida pelo método da sobreposição proposto e as correlações geradas por Dorigon, 2012 para razões de mistura

(a) $p_w/p_c = 1/1$ e (b) $p_w/p_c = 2/1$.

Para quantificar as discrepâncias gráficas apresentadas, a equação abaixo foi utilizada para calcular o erro máximo (δ_{max}) e médio (δ_{avg}), que existe entre os valores de emitância obtidos por Dorigon, 2012, e pela metodologia utilizada neste trabalho. O erro calculado no ponto máximo é dado pelo módulo da maior diferença calculada para uma determinada temperatura local T . O resultado é então dividido pelo maior valor local, calculado pela solução utilizada como referência conforme pode ser visto abaixo:

$$\frac{|\varepsilon(T)_{Dorigon,2012} - \varepsilon(T)_{Proposto}|}{|\varepsilon(T)_{Dorigon,2012}|} 100\% \quad (6.1)$$

A Tabela 6.1 mostra os erros máximos e médios para diferentes parâmetros pressão-distância e razões de mistura computados.

Tabela 6.1 – Erro máximo (δ_{max}) e médio (δ_{avg}) das emitâncias obtidas pelo modelo proposto e comparadas com Dorigon, 2012.

Emitância ϵ				
ERRO (%)	$p_w/p_c = 1/1$		$p_w/p_c = 2/1$	
	δ_{max}	δ_{avg}	δ_{max}	δ_{avg}
10 atm m	7,93%	4,86%	5,57%	3,39%
1,0 atm m	7,34%	5,09%	5,98%	3,90%
0,1 atm m	1,16%	0,81%	0,52%	0,31%
0,01 atm m	1,69%	0,41%	1,97%	0,49%

É importante destacar que, tratando-se de um modelo espectral simplificado, a ocorrência de discrepâncias como as apresentadas são toleráveis. Uma análise das diferenças geradas com uso da sobreposição foi realizada por Cassol, 2013, que, apesar de demonstrar que o uso da ferramenta conduz a novos erros, a implementação é uma alternativa considerável dado o baixo custo de recursos computacionais.

6.2 Termos de correção da mistura

Os termos de correção obtidos são apresentados graficamente na Figura 6.2, onde a visualização é feita na perspectiva dos parâmetros pressão-distância $p_a S$ mais elevados. Os gráficos mostram o comportamento da emissividade nas cinco razões de mistura p_w/p_c nos valores 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 sendo que para os parâmetros pressão-distância menores os termos de correção são exibidos graficamente na Figura 6.3.

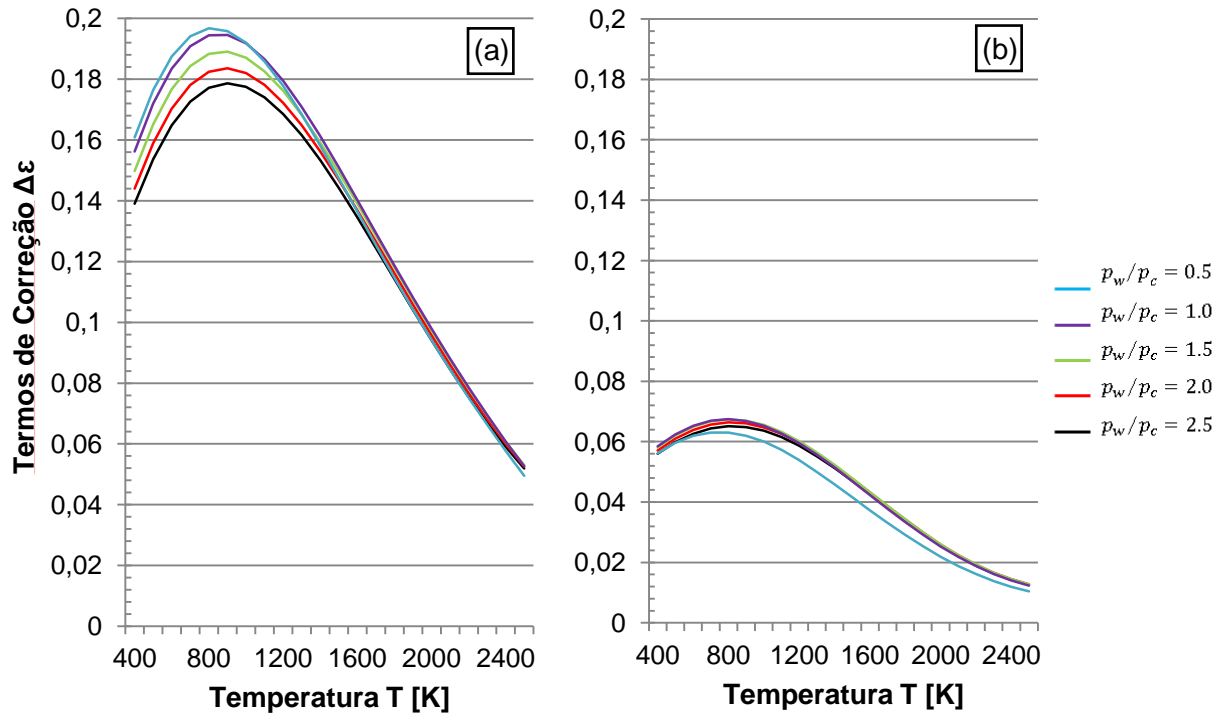


Figura 6.2 – Termos de correção calculados para cinco razões de mistura com
 (a) $p_a S = 10 \text{ atm} \cdot m$ e (b) $p_a S = 1,0 \text{ atm} \cdot m$

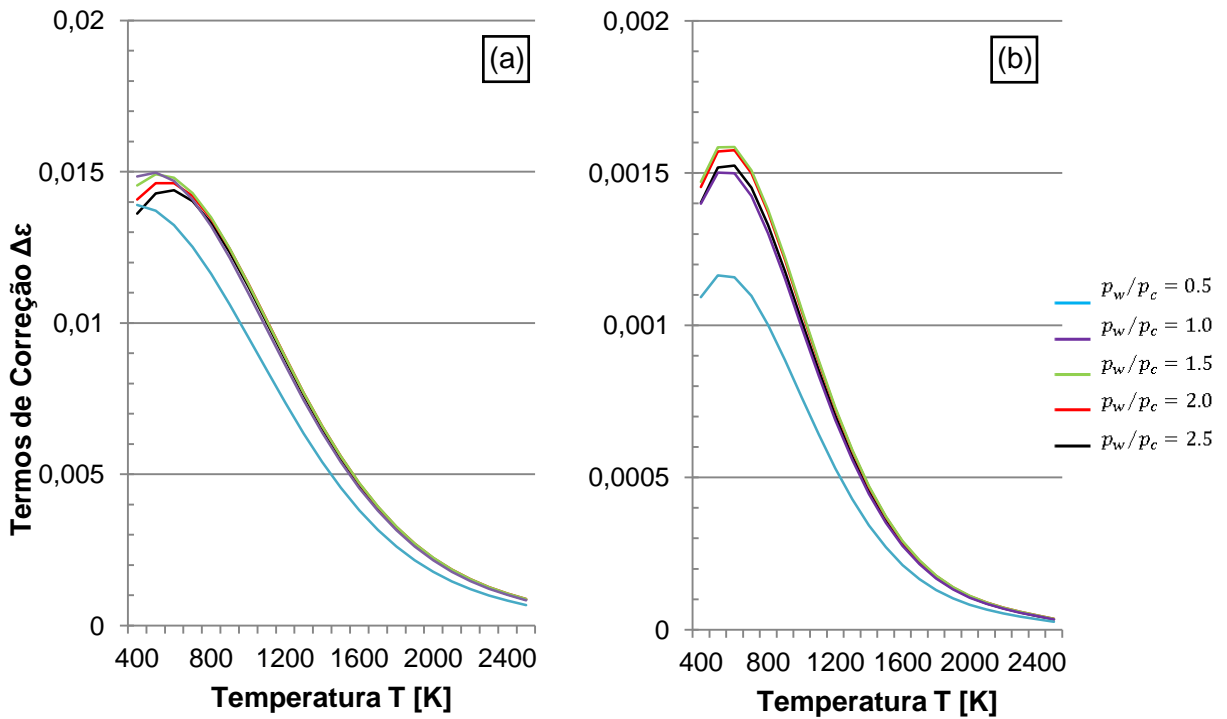


Figura 6.3 – Termos de correção calculados para cinco razões de mistura com
 (a) $p_a S = 0,1 \text{ atm} \cdot m$ e (b) $p_a S = 0,01 \text{ atm} \cdot m$

Os termos de correção de emitância para misturas foram gerados de acordo com a razão molar e têm por objetivo compensar as diferenças inerentes à mistura de gases computados através da soma das emitâncias de espécies de vapor de água e dióxido de carbono obtidas separadamente. O comportamento dos termos de emitância obtidos e analisados graficamente revelaram uma baixa dependência da razão de mistura quando computados em temperaturas elevadas. As demais emitâncias computadas para as espécies separadamente em diferentes razões de mistura, nos quatro parâmetros pressão-distância analisados, encontram-se no Apêndice II.

7. CONCLUSÃO

Os resultados de emitância obtidos pelo modelo da soma ponderada dos gases cinzas com uso do método da superposição foram satisfatórios. A comparação entre as emitâncias calculadas por Dorigon *et al.*, 2013 e as computadas através do modelo proposto nas razões de mistura $p_w/p_c = 1/1$ e $2/1$ geraram erros máximos de aproximadamente 8% e erros médios de até 6% para parâmetros pressão-distância mais elevados.

Os termos de correção de emitância foram obtidos para diferentes razões de mistura que, em concordância com o objetivo deste trabalho, apresentou os resultados na forma gráfica, revelando a baixa influência da razão de mistura nos termos de correção quando calculados para altas temperaturas. Alguns outros tópicos a serem abordados nessa linha de pesquisa em próximos trabalhos podem incluir, por exemplo, a geração de coeficientes de correção de pressão levando em conta diferentes pressões totais. Outro estudo importante a ser feito é referente à geração de valores de emitância com outros gases cinzas e com a fuligem, produto típico da queima de combustíveis fósseis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASSOL, F. **Geração de soluções benchmark e Avaliação de modelos de Radiação Térmica em Processos de Combustão**. Tese de doutorado, Programa de pós Graduação em Engenharia Mecânica UFRGS – Porto Alegre, 2013.

CASSOL, F.; BRITTES, R.; FRANÇA, F.H.R.; EZEKOYE, O.A. Application of the weighted-sum-of-gray-gases model for media composed of arbitrary concentrations of H₂O, CO₂ and soot. **International Journal of Heat and Mass transfer**. v.79, p. 796–806, 2014.

DORIGON, L.J. **Determinação de coeficientes do Modelo da soma-ponderada-dos-gases-cinzas a partir do banco de dados HITEMP 2010**. Porto Alegre: UFRGS, 2012.

(Dissertação de Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

DORIGON, L.J.; DUCIAK, G.; BRITTES, R.; CASSOL, F.; GALARÇA, M.; FRANÇA, F.H.R. WSGG Correlations based on HITEMP 2010 for computation of thermal radiation in non-isothermal, non-homogeneous H₂O/CO₂ mixtures. **International Journal of Heat and Mass transfer**. v.64, p. 863-873, 2013.

DUCIAK, G. **Aplicação do Modelo da soma-ponderada-de-gases-cinzas em meios não-isotérmicos e não homogêneos**. Porto Alegre: UFRGS, 2013. (Dissertação de Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

HOTTEL, H. C. Radiant-heat transmission, *Heat Transmission*, Ch. 4 W. H. McAdams, McGraw-Hill, 3rd ed., New York. (1954)

HOTTEL, H.C.; Sarofim, A.F. **Radiative Transfer**. McGraw-Hill Book Company, 1967.

MODEST, M.F. **Radiative Heat Transfer**. McGraw-Hill, New York, 1991.

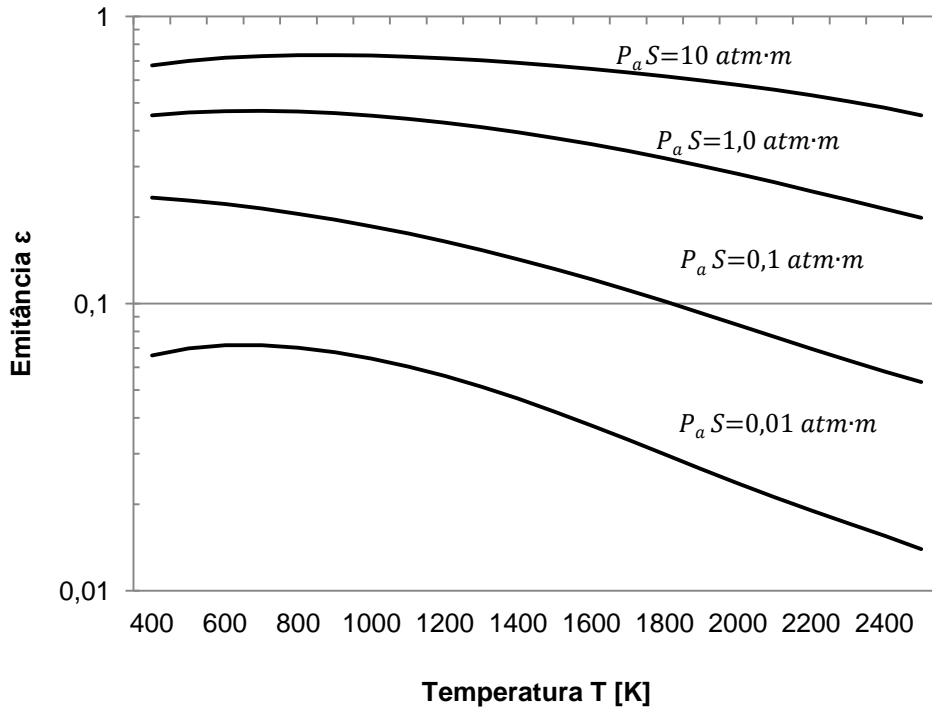
ROTHMAN, L.S. et al. HITEMP, the High-Temperature Molecular Spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. v. 111, p. 2139-2150, 2010.

SIEGEL, R.; HOWELL, J.R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. **Taylor & Francis**. 4th edition, New York - London, 2002

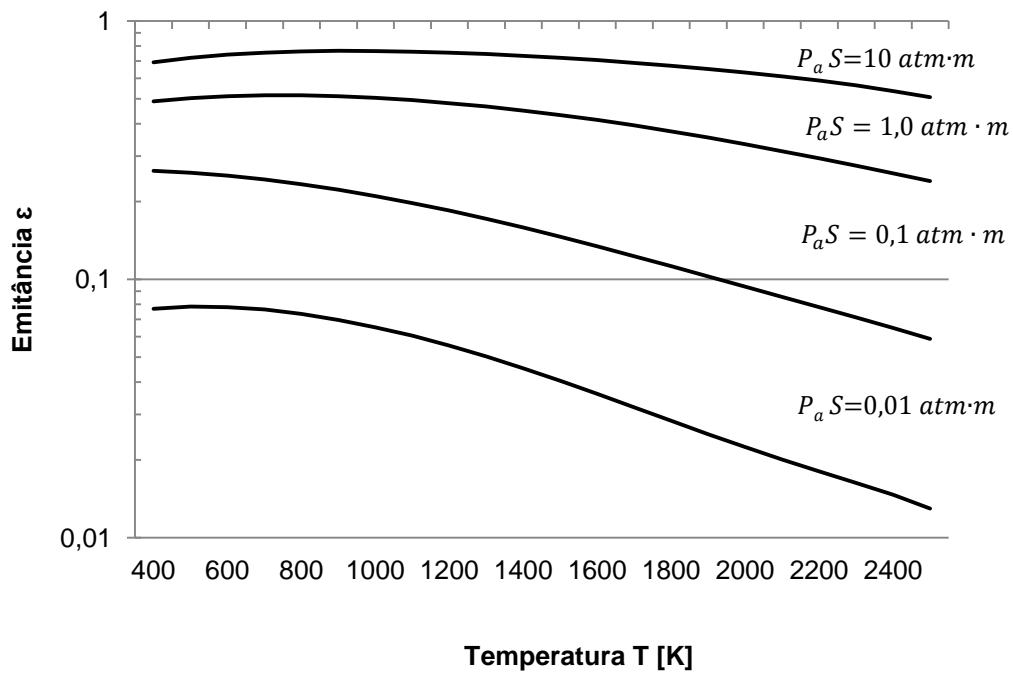
SMITH, T.F.; SHEN, Z.F.; FRIEDMAN, J.N. Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model. **Journal of Heat Transfer**. v. 104, p. 602-608, 1982.

APÊNDICE I – Emitâncias geradas para demais razões de mistura

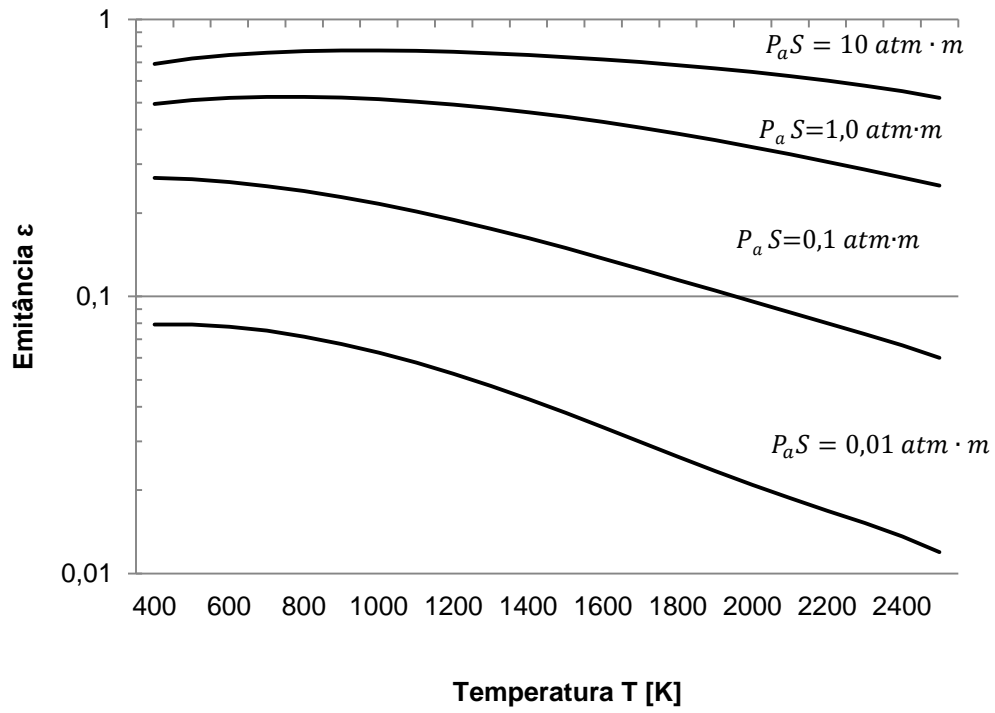
- Gráfico de Emitância X Temperatura - Razão de mistura $p_w/p_c = 0,5$



- Gráfico de Emitância X Temperatura - Razão de mistura $p_w/p_c = 1,5$

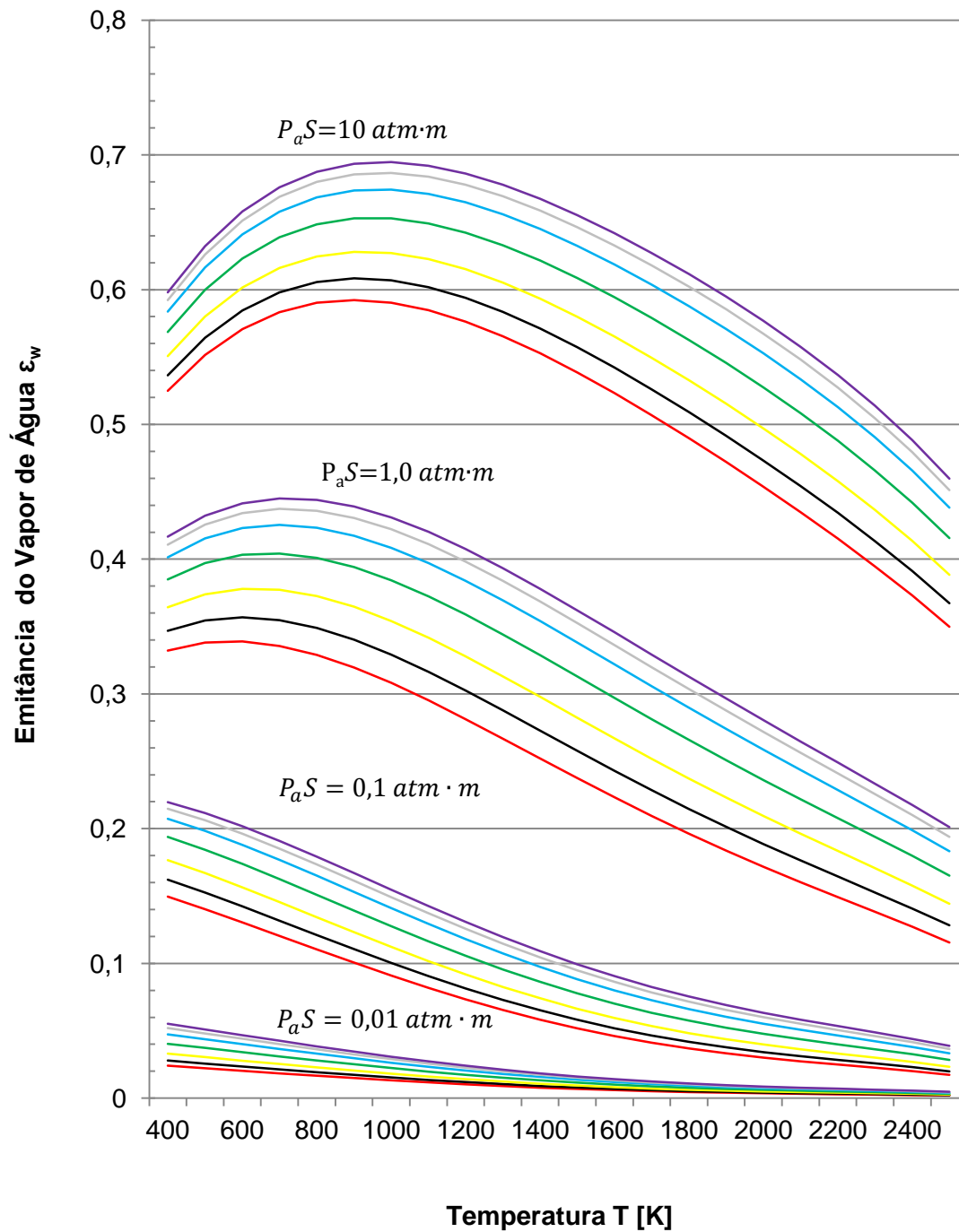


- Gráfico de Emitância X Temperatura - Razão de mistura $p_w/p_c = 2,5$

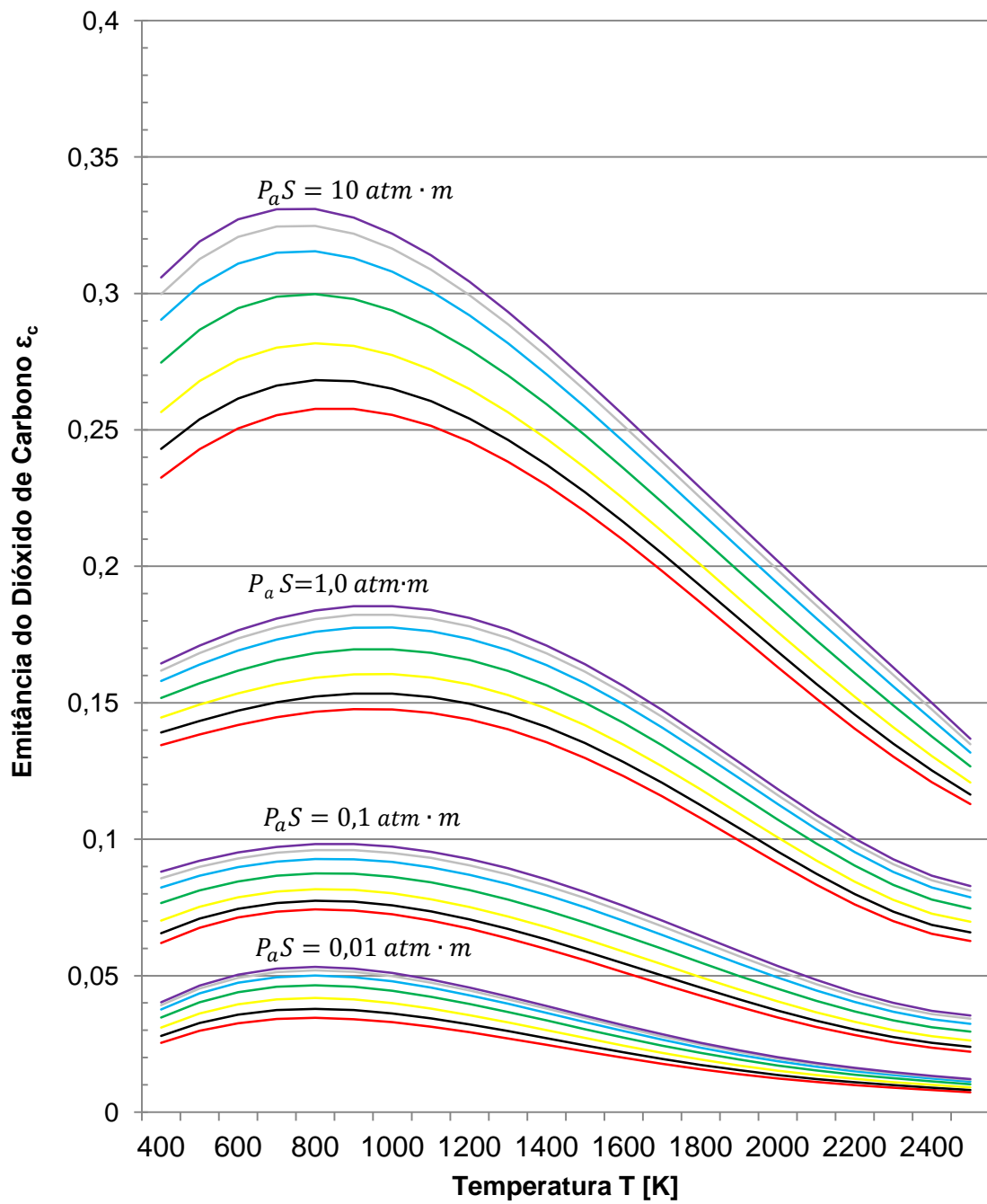


APÊNDICE II – Emitâncias geradas para espécies separadamente

- Gráfico de Emitância X Temperatura - Vapor de água



- Gráfico de Emitância X Temperatura – Dióxido de Carbono



Legenda:

