VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

NOVO NÚMERO ADIMENSIONAL CARACTERÍSTICO DOS FENÔMENOS DA COMBUSTÃO

Paulo Cesar da Costa PINHEIRO, Pinheiro@netuno.Lcc.ufmg.br, PauloCPinheiro@ufmg.br [1]
Borisas CIMBLERIS (1923-2000, *in Memoriam*)

[1] Universidade Federal de Minas Gerais UFMG, Dept. Engenharia Mecânica, Av. Antonio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG

Resumo: *Não existe na literatura um número adimensional que permita comparar a combustão de gases diferentes. O Indice de Wobbe* $\boldsymbol{Iw = PCs_v / \sqrt{d}}$*, onde* $\boldsymbol{PCs_v}$ *é o poder calorífico superior (volumetrico) e* **d** *a densidade relativa (em relação ao ar) não é adimensional, e compara 2 propriedades do gás. Neste indice faltam parâmetros definidores da cinética da combustão, a saber a pressão e a velocidade. Foram analizadas as possíveis relações funcionais na combustão homogênea, selecionando variáveis relevantes dentre as propriedades do gás combustível, a geometria do queimador e propriedades cinéticas tais como a velocidade do gás. A análise dimensional revelou alguns agrupamentos* $\boldsymbol{\Pi}$ *ainda não apresentados na literatura cientifica. Estes novos numeros adimensionais podem eventualmente servir de comparação na seleção de gases combustíveis e no projeto de queimadores. Propõe-se como critério para estudo da intercambiabilidade de gases o seguinte número adimensional:*

$$Pi = \frac{PCs_m}{V\sqrt{P/\rho}}$$

onde $\boldsymbol{PCs_m}$ *é o poder calorífico superior mássico (kJ/kg),* **V** *a velocidade do gás devidamente definida (m/s),* **P** *a pressão do gás (N/m²) e* $\boldsymbol{\rho}$ *a massa específica (kg/m³) nas condições normais (0ºC, 1 atm).*

Palavras-chave: *Combustão, Intercambiabilidade de gases, Índice de Wobbe, Análise dimensional, Números Adimensionais*

1. INTRODUÇÃO

Todo equipamento de combustão de gases é capaz de tolerar uma certa variação nas propriedades do gás utilizado.

Os principais critérios para análise da aceitação de uma mistura de gases são os que asseguram liberação de energia, estabilidade de chama, combustão completa e facilidade de ignição similares, sem a necessidade de ajustes no equipamento. Gases que satisfazem a estes critérios são chamados intercambiáveis. As misturas de gases combustíveis realizadas somente com base na manutenção de um poder calorífico similar, podem não ser satisfatórias para o uso.

Existem limites onde a intercambiabilidade satisfatória pode ocorrer, e é importante delimitar estes limites de uma forma precisa e compreensiva. Desta forma pode ser possível prever com razoável precisão, a partir do conhecimento da composição do gás, se ele é intercambiável com o gás utilizado, sem a necessidade de determinação experimental de suas características de combustão. Uma revisão das técnicas de avaliação da intercambiabilidade é dada por Delbourg e Lafon (1971).

Wobbe (1926) propôs estabelecer as características da combustão dos gases pelo índice $\boldsymbol{Iw = PCs_v / \sqrt{d}}$, onde $\boldsymbol{PCs_v}$ é o poder calorífico superior (volumétrico) e **d** a densidade relativa (ar = 1). O Índice de Wobbe não é um número adimensional, e é normalmente expresso em Btu/ft³ (standard) ou em MJ/m³ (standard) (1000 Btu/ft³ = 37,3 MJ/m³). O índice de Wobbe de alguns combustíveis gasosos é apresentado na tabela 1.

O índice de Wobbe representa a taxa de fluxo de calor em um injetor e é amplamente aceito como um índice padrão da intercambiabilidade de gases. Ele é utilizado para comparar a produção térmica de um equipamento utilizando combustíveis gasosos de diferentes composições. É uma medida da quantidade de energia disponibilizada em um sistema de combustão através de um orifício injetor. Ele é representativo da energia do combustível introduzida em um equipamento de combustão, quando a pressão de alimentação do gás é mantida constante. Se dois combustíveis possuem Índice de Wobbe idênticos, para uma determinada pressão e determinada posição da válvula de controle, a produção térmica será idêntica. Tipicamente variações de 5% são permitidas e não são percebidas pelo usuário. O índice de Wobbe é geralmente aceito como o melhor índice (único) para determinar a intercambilidade de gases. Entretanto, ele não é totalmente satisfatório uma vez que variações das características das chamas podem não são contempladas.

Tabela 1. Índice de Wobbe dos Combustíveis Usuais (kcal/m^3 standard).

Gás	Índice Mínimo	Índice Máximo
Hidrogênio	9.715	11.528
Metano	11.452	12.735
Etano	14.931	16.298
Etileno	14.344	15.253
Gás Natural	11.597	12.837
Propano	17.817	19.376
Propileno	17.180	18.413
n-Butano	20.336	22.066
Iso-Butano	20.247	21.980
Butileno-1	19.728	21.142
GLP	19.106	20.755
Acetileno	14.141	14.655
Monóxido de Carbono	3.060	3.060

Existem 3 faixas ou "famílias" de combustíveis gasosos, baseadas no Índice de Wobbe, aceitas internacionalmente: a família 1 engloba os gases manufaturados, a família 2 os gases naturais e a família 3 os gases liquefeitos de petróleo GLP (tabela 2). Um equipamento de combustão é normalmente projetado para queimar um combustível de uma determinada família.

Tabela 2. Famílias dos Gases Combustíveis.

Família	Tipo de Gás	Faixa Índice de Wobbe (MJ/m^3)
1	Gás de Rua / Sintético	22,5 – 30
2 L	Gás Natural	39 – 45
2 H	Gás Natural	45,5 – 55
3	GLP	73,5 – 87,5

Outras características da chama e limites de composição podem determinar a aceitabilidade de substituição do gás, por exemplo, velocidade da chama, teor de enxofre etc. Através da experiência prática, testes em equipamentos e análises de intercambiabilidade, uma faixa de índice de Wobbe pode ser determinada de modo a assegurar um determinado desempenho do equipamento, bem como assegurar segurança de operação para o usuário. Tipicamente esta faixa é expressa como uma variação (para mais ou menos) no índice de Wobbe representativo das características do combustível gasoso para qual o equipamento foi ajustado.

2. ANÁLISE DIMENSIONAL

A análise dimensional baseia-se no princípio de que todas as leis físicas completas e verdadeiras podem ser expressas em termos de números adimensionais, não dependendo assim das unidades de medida de cada uma das variáveis. As principais grandezas físicas podem ser expressas em função de 5 dimensões básicas: massa (**M**), comprimento (**L**), tempo (**T**), corrente elétrica (**I**), e temperatura (**θ**) (tabela 3). Deve-se notar que não há conjunto específico de dimensões que devam ser obrigatoriamente utilizadas. ex: Pode-se utilizar força (**F**) como "dimensão" em lugar de **M**, **L**, e é também comum a utilização simultânea de **Q** e **θ** como dimensões.

Tabela 3. Grandezas Físicas Fundamentais.

Dimensões	Símbolo da Dimensão	Unidade no SI	Símbolo no SI
Comprimento	L	metro	m
Massa	M	quilograma	kg
Tempo	T	segundo	s
Temperatura termodinâmica	θ	kelvin	K
Corrente elétrica	I	ampère	A
Intensidade luminosa	I_0	candela	cd
Quantidade de matéria	N	mols	mol

A Análise Dimensional sugere métodos simplificados de análise de resultados experimentais sobre um vasto campo de fenômenos difíceis de serem analisados teoricamente, e estabelece as condições de teste em modelos reduzidos de protótipos operando em condições especiais.

Tabela 4. Números Adimensionais Π Importantes.

Nome	Símbolo	Definição
Reynolds	Re	$Re = D.V.\rho \ / \ \mu$
Nusselt	Nu	$Nu = h_c.D / k$
Prandtl	Pr	$Pr = Cp.\mu / k$
Grashoff	Gr	$Gr = L^3.\rho^3.g.\beta.\ t / \mu^3$
Mach	M	$M = V / c$
Stanton	St	$St = Nu / (Re.Pr)$
Fator de Fricção	*f*	$f = P.g_c.D / (2.L.\rho.V^2)$

2.1. Teorema dos Π de Buckingham:

O teorema dos **Π** de Buckingham é o teorema fundamental da análise dimensional. Este teorema estabelece que as leis físicas são independentes das unidades (sistema de unidades) utilizadas. Assim, uma lei física é homogênea em todas as dimensões. Dada uma equação:

$$x_0 = f(x_1, x_2, ..., x_n)$$

Esta equação também pode ser escrita sob a forma:

$$\frac{x_0}{f} - 1 = 0$$

Definindo:

$$g \equiv \frac{x_0}{f} - 1$$

A equação se torna:

$$g(x_0, x_1, x_2, ..., x_n) = 0$$

Se dimensões de cada variável são:

$$[x_1] = [Massa]^{a_i,M}[Tempo]^{a_i,T}[Comprimento]^{a_i,L}$$

Substituindo as unidades massa pelo fator λ_M não afetara o resultado:

$$g(\lambda_M^{a_0,M_{2_0}}, \lambda_M^{a_1,M_{2_1}}, ..., \lambda_M^{a_n,M_{2_n}}) = g(x_0, x_1, ..., x_n)$$

Aplicando o teorema de Euler para as funções homogêneas (diferenciação em relação a λ_M e fazendo $\lambda_M = 0$)

$$a_{1,M}\frac{\partial f}{\partial x_1}x_1 + a_{2,M}\frac{\partial f}{\partial x_2}x_2 + ... + a_{n,M}\frac{\partial f}{\partial x_n}x_n = 0$$

$$a_{1,M}\frac{\partial f}{\partial \ln x_1} + a_{2,M}\frac{\partial f}{\partial \ln x_2} + ... + a_{n,M}\frac{\partial f}{\partial \ln x_n} = 0$$

Do mesmo modo, substituindo as unidades de tempo por λ_T e as unidades de comprimento por λ_L:

$$a_{1,T}\frac{\partial f}{\partial \ln x_1} + a_{2,T}\frac{\partial f}{\partial \ln x_2} + ... + a_{n,T}\frac{\partial f}{\partial \ln x_n} = 0$$

$$a_{1,L}\frac{\partial f}{\partial \ln x_1} + a_{2,L}\frac{\partial f}{\partial \ln x_2} + ... + a_{n,L}\frac{\partial f}{\partial \ln x_n} = 0$$

Se x_1 possui **m** unidades (dimensões), há portanto **m** equações independentes. Se existem **n** variáveis x_1, então a interseção dos hiperplanos **m** no espaço de dimensão **n** é uma superfície bidimensional **n-m**.

Assim, este teorema estabelece que dada uma lei física ***f*** onde estão envolvidas **n** variáveis físicas x_n (propriedades físicas como velocidade, densidade, viscosidade dinâmica, etc.), se estas variáveis podem ser expressas em função de **m** unidades físicas independentes (dimensões fundamentais dos sistemas tais como massa, comprimento e tempo), então a lei física pode ser expressa por uma série de **n-m** números adimensionais independentes (chamados grupos de **Π**), obtidos a partir das variáveis originais.

O 1º teorema dos **Π** de Buckingham pode ser enunciado da seguinte forma:

"Se um processo físico é governado por uma relação dimensionalmente homogênea que compreende **n** parâmetros dimensionais, tais como:

$$\mathbf{x_0 = f\,(x_1, x_2,...., x_n)}$$

onde ***x*** são variáveis dimensionais, existe uma relação equivalente que contém um número (**n-m**) de parâmetros adimensionais, tais como:

$$\mathbf{\Pi_0 = f\,(\Pi_1, \Pi_2,..., \Pi_{n\text{-}k})}$$

onde **Π** são grupos adimensionais obtidos a partir das variáveis ***x***. A redução **m** geralmente é igual ao número de dimensões fundamentais contidas em ***x***, mas nunca maior que ele".

Ou de forma mais simplificada

"Uma equação adimensional de uma lei física requer uma quantidade de números adimensionais (designados por **Π**) igual, no máximo ao número de variáveis menos o número de dimensões envolvidas".

O 2º teorema dos **Π** de Buckingham pode ser enunciado da seguinte forma:

Cada grupo dos **Π** é uma função de **n** das variáveis fundamentais mais uma das variáveis restantes.

O teorema dos **Π** de Buckingham permite obter o número de grupos adimensionais independentes necessários para definir uma lei física, inclusive quando a forma da lei física não conhecida. A forma de determinação dos parâmetros adimensionais não é única, e não é necessário que os números adimensionais possuam significado físico.

2.2. Aplicação do Teorema dos Π de Buckingham:

Para a construção completa de um sistema de grupos adimensionais, utiliza-se o seguinte método:

2.2.1) Escrever uma relação funcional para a relação dimensional pesquisada, assegurando de incluir todos os parâmetros dimensionais relevantes (tabela 5.a)

2.2.2) Determinar o número de variáveis envolvidas **n** (tabela 5.b)

2.2.3) Determinar o número de dimensões envolvidas **m** (tabela 5.c)

2.2.4) Determinar o número de adimensionais necessários para definir a lei física **n-m** (tabela 5.d)

Tabela 5. Exemplo do Uso da Análise Dimensional.

	Perda de Carga por Fricção em Dutos (Regime Turbulento)		**Transmissão de Calor por Convecção** (Regime Turbulento)	
5.a	$\mathbf{H_{fricção} = f\,(L, D, \nu, \rho, \mu, \varepsilon)}$		$\mathbf{h_c = f\,(D, v, \rho, \mu, Cp, k)}$	
	Variáveis envolvidas: 1) Perda de Carga ($\mathbf{H_{fricção}}$) 2) Comprimento (**L**) 3) Diâmetro do tubo (**D**) 4) Velocidade Média (**v**) 5) Densidade (**ρ**) 6) Viscosidade dinâmica do fluido (**μ**) 7) Rugosidade absoluta do duto (**ε**)	 L L L L/T M/L^3 M/LT L	Variáveis envolvidas: 1) Coeficiente Transmissão Calor ($\mathbf{h_c}$) 2) Diâmetro (**D**) 3) Velocidade Média do Fluido (**v**) 4) Densidade (**ρ**) 5) Viscosidade dinâmica do fluido (**μ**) 6) Calor Específico (**Cp**) 7) Condutividade Térmica (**k**)	 M/θ^3T L L/T M/L^3 M/LT $L^2/T^2\theta$ $M.L/T^3\theta$
5.b	Total = 7		Total = 7	
5.c	Dimensões envolvidas: 3	L, M, T	Dimensões envolvidas: 4	L,M,T, θ
5.d	Números adimensionais necessários: 7 - 3 = 4		Números adimensionais necessários: 7 - 4 =3	
	Geralmente utiliza-se: f = (Re, ξ) (ξ = fator de rugosidade = **ε**/D)		Geralmente utiliza-se: Nu = (Re, Pr)	

2.2.5) Calcular os grupos Adimensionais **Π:**

Analisando o exemplo da perda de carga por fricção em dutos, a relação funcional é expressa elevando as variáveis dependentes aos seus respectivos coeficientes:

$$[L] = f\,([L]^a, [L]^b, [L.T^{-1}]^c, [M.L^{-3}]^d, [M.L^{-1}.T^{-1}]^e, [L]^f)$$

Como a equação deve ser dimensionalmente homogênea, o lado esquerdo da igualdade tem que ter a mesma dimensão do lado direito da igualdade, assim:

[L] = 1 = a + b + c – 3d – e + f
[T] = 0 = - c – e
[M] = 0 = d + e

Como resultado tem-se um sistema de 3 equações e 6 incógnitas, pelo qual se escolhem 3 variáveis (que se desejam que se repitam nos diferentes grupos adimensionais) , e se põe em função das demais.

Neste caso, escolhendo a densidade (d), a velocidade (c) e o diâmetro (f):
d = - e
c = - e
1 = a + b – e – 3(- e) – e + f = a + b + e + f
f = 1 – a – b – e

Substituindo na relação fundamental:
$[L] = f\,([L]^{a}, [L]^{b}, [L.T^{-1}]^{-e}, [M.L^{-3}]^{-e}, [M.L^{-1}.T^{-1}]^{e}, [L]^{1-a-b-e})$
e agrupando as potências se obtém finalmente:

$$\frac{H_{fricção}}{D} = f\left(\frac{\mu}{D.\rho.v}, \frac{\varepsilon}{D}, \frac{L}{D}\right)$$

Na construção dos grupos adimensionais deve-se levar em conta os seguintes preceitos:
- As variáveis escolhidas têm que ser mensuráveis, e serem representativas na variável dependente.
- Cada grupo dos **Π** é uma função de **m** das variáveis fundamentais mais uma das variáveis restantes.
- Cada variável deve aparecer em pelo menos um número adimensional.
- Não é necessário que as todas as dimensões estejam presentes em todas as variáveis.
- Nenhum dos números adimensionais pode ser derivado exclusivamente dos outros empregados na equação.

A teoria da similaridade torna possível o cálculo de diversos problemas a partir dos números adimensionais. As equações para as diversas situações práticas são encontradas na literatura. Deve ser lembrado, que cada equação só pode ser utilizada dentro dos limites das constantes utilizadas no experimento, isto é dentro dos limites estabelecidos pelas condições de similaridade.

A maior limitação da análise dimensional é devido ao fato que ela não fornece nenhuma informação sobre a natureza do fenômeno. Assim, para utilizar a análise dimensional é necessário conhecer a priori quais as variáveis que influem no fenômeno.

3. NOVOS NUMEROS ADIMENSIONAIS PARA O PROCESSO DE COMBUSTÃO

A revisão bibliográfica mostra vários números adimensionais utilizados na análise do processo de combustão (tabela 6). A similaridade da combustão de gases (intercambiabilidade) é usualmente determinada a partir do Índice de Wobbe **Iw**, que não é um número adimensional.

Tabela 6. Números Adimensionais Para a Análise do Processo de Combustão de Gases.

Nome	Equação	Obs.
Euler	$Eu = (\rho\ .V^2)/P$	inércia / pressão
Peclet	$Pe = Cp.V.D.\rho\ /\ k$	$k\ /\ (Cp.\rho.V)$ = espessura da zona de radiação
Wobbe	$Iw = PCs_v\ /\ \sqrt{d}$	Não adimensional
Wobbe modificado	$Iw = PCs_v\ /\ \sqrt{(d.P)}$	Não adimensional

A fim de analisar a existência de números adimensionais que caracterizassem o processo de combustão, foi realizada uma análise dimensional. A geração máxima de calor na chama (taxa de reação volumétrica **q”**) pode ser caracterizada pelo seguinte conjunto de variáveis:

$$\mathbf{q'' = \mathit{f}\,(Cp, k, \rho, V, PCs_m, T, P)}$$

onde **Cp** é o Calor específico, **k** a condutividade térmica da mistura combustível, **ρ** a massa específica do gás, **V** a velocidade, $\mathbf{PCs_m}$ o poder calorífico (mássico), **T** a temperatura e **P** a pressão. A espessura da zona de reação $\mathbf{\delta=k/(Cp.\rho.v)}$ já esta contemplada nas dimensões acima. Adotando a hipótese de $\mathbf{PC_S \approx q''}$, podem-se encontrar através da análise dimensional as formas funcionais envolvidas no processo de combustão apresentadas na tabela 8.

Tabela 7. Variáveis Envolvidas na Geração de Calor na Chama.

Variáveis envolvidas	Símbolo	Unidade	Dimensões
1) Taxa de reação volumétrica	**q''**	$J/s.m^3 = kg{\cdot}m^2/s^2.s.m^3$	$M/T^3.L$
2) Calor específico	**Cp_m**	$J/kg.K = kg{\cdot}m^2/s^2.kg.K$	$L^2/T^2.\theta$
3) Condutividade Térmica	**k**	$J/s.m.K = kg{\cdot}m^2/s^2.s.m.K$	$M.L/T^3.\theta$
4) Massa específica	**ρ**	kg/m^3	M/L^3
5) Velocidade	**V**	m/s	L/T
6) Poder Calorífico	**PCs_m**	$J/kg = kg{\cdot}m^2/s^2.kg$	L^2/T^2
7) Temperatura	**T**	K	θ
8) Pressão	**P**	N/m^2	$M/L.T^2$
Total	**8**		**M.L.T.θ = 4**

Pelo teorema dos **Π** com 8 variáveis, se forem subtraídas as 4 dimensões de base (**M**, **L**, **T**, **θ**) podem ser encontrado **8 - 4 = 4** grupos adimensionais **Π**.

$$\frac{M}{T.L^3}=\left(\frac{L^2}{T^2.\theta}\right)^a\left(\frac{M.L}{T^3.\theta}\right)^b\left(\frac{M}{L^3}\right)^c\left(\frac{L}{T}\right)^d\left(\frac{L^2}{T^2}\right)^e(\theta)^f\left(\frac{M}{L.T^2}\right)^g$$

Como a equação deve ser dimensionalmente homogênea, o lado esquerdo da igualdade tem que ter a mesma dimensão do lado direito da igualdade, assim:

[M] = 1 = b + c + g

[L] = -3 = 2a + b - 3c + 2e - g

[T] = -1 = - 2a – 3b – d – 2e – 2g

[θ] = 0 = - a – b + f

Tabela 8. Formas Funcionais da Geração de Calor na Combustão pela Análise Dimensional.

	Variáveis	Forma	Obs.
1	k, Cp, ρ, V, PCs_m, P	$q''=\dfrac{Cp.\rho.PCs_m.P}{k}$	Elimina **V**
2	k, Cp, ρ, V, PCs_m	$q''=\dfrac{k^2.PCs_m}{Cp^2.V}$	(ruim) Elimina **ρ**
3	k, Cp, ρ, V, PCs_m, P, T	$q''=\dfrac{\rho.V^2.P.T.PCs_m}{k}$	Elimina **Cp**
4	k, Cp, ρ , D, V, PCs_m, P	$q''=\dfrac{\rho.Cp.P.PCs_m}{k}$	Elimina **V**, **D**

Estas formas funcionais apresentam as seguintes características comuns:

1) **Cp** : numerador, exceto 2.
2) **k** : denominador, exceto 2.
3) **PC_S**: numerador.
4) **ρ** : numerador em 1, 3, 4.

Excluindo a condutividade térmica **k**, foram encontrados **n-m = 7-4=3** números adimensionais **Π** para a combustão de gases apresentados na tabela 9.

Tabela 9. Novos Números Adimensionais Propostos para o Processo de Combustão de Gases.

	Equação	Obs.
1	$\Pi=\dfrac{PCs_m.\rho}{q''.\,t}$	**t** = tempo característico
2	$\Pi=\dfrac{V^2.PCs_m.\rho}{q''.\sqrt{P/\rho}}$	$\dfrac{PCs_m.\rho}{\sqrt{P/\rho}}=\dfrac{PCs_v}{\sqrt{P/\rho}}=$ Wobbe modificado
3	$\Pi=\dfrac{PCs_m}{V\sqrt{P/\rho}}$	

4. CONCLUSÕES

Investigaram-se possíveis relações funcionais na combustão homogênea, e a partir da analise dimensional foram encontrados novos números adimensionais.

Propõe-se como critério para estudo da intercambiabilidade de gases o seguinte número adimensional:

$$Pi = \frac{PCs_m}{V\sqrt{P/\rho}}$$

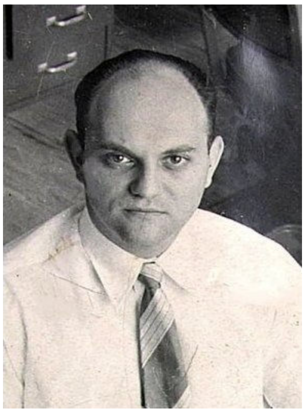
onde **PCs$_m$** é o poder calorífico superior mássico (kJ/kg), **V** a velocidade do gás devidamente definida (m/s), **P** a pressão do gás (N/m^2) e **ρ** a massa específica (kg/m^3) nas condições normais (0°C, 1 atm).

Um alto valor deste número adimensional corresponde a condições favoráveis (**Q** alto, **V** baixo, **P** baixo e **ρ** alto). A temperatura entra indiretamente através de **P** (e de **ρ**, se tomarmos a massa específica referida à temperatura da chama. Para analisar o efeito da velocidade, pode-se estabelecer **P/ρ** = cte. A pressão **P** contrabalança o efeito da massa específica **ρ**.

Para o estudo da combustão de gases, propõe-se o seguinte conjunto de adimensionais:

$$0 = f\left(\frac{\rho.V^2}{P}, \frac{Cp.V.D.\rho}{k}, \frac{PCs_m}{V\sqrt{P/\rho}}\right) = f\left(Eu, Pe, Novo\right)$$

Esta metodologia também foi aplicada à combustão de combustíveis líquidos pulverizados, e foram obtidos os mesmos critérios adimensionais já apresentados por Griffer e Spalding.



5. AGRADECIMENTOS

O autor agradece de forma especial à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) a concessão de auxílio que permitiram a sua presença VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM 2010.

O autor presta aqui a sua homenagem ao Prof. Borisas Cimbleris falecido em 29 de Abril de 2000, co-autor deste trabalho, que não pode ver publicado este seu trabalho.

6. REFERÊNCIAS

BELLIBONI, Caetano. O Problema da Intercambiabilidade dos Gases. Engenharia Química, v.3, n.1, pp.37-40.

BUCKINGHAM, E.. On Physically Similar Systems: Illustrations of the Use of Dimensional Equations. Physical Review, v.4, n.4, pp.345-376, 1914.

BUCKINGHAM, E.. Model Experiments and the Form of Empirical Equations. Trans. ASME, v.37, pp.263-296, 1915.

BUCKINGHAM, E.. The Principle of Similitude. Nature, v.96, pp.396-397, 1915.

CIMBLERIS, Borisas. Um Caso de Descoberta Simultânea. O Teorema Π da Análise Dimensional. Ciência e Cultura, São Paulo, v.32, n.5, pp.547-549, Maio 1980.

CLAUSING, Erin M.; SENSER, Dwight W.; LAURENDEAU, Normand M.. Peclet Correlation for Stability of Inverse Diffusion Flames in Methane-Air Cross Flows. Combustion and Flame, v.110, pp.405-408, 1997

CNP. Regulamento Técnico CNP 12/1982, 30 Novembro 1982. DOU, 16 Dezembro 1982, p.23639-23641.

DELBOURG, P.; SCHNECK, H.. Etude sur L'Interchageabilité des Gaz. Analles du 47ème Congres de l´Industrie du Gas, Paris, Association Technique de L´Industrie du Gaz en France, 1957, p.756-834.

DELBOURG, Paul; LEFON, Jean. Interchangeabilité des Gaz. Association Technique de L'Industrie du Gaz em France. Paris, 199p., 1971.

WEAVER, Elemer M.. Formulas and Graphs for Representing the Interchangeability of Fuel Gases. Journal of Research of the National Bureau of Standarts. v.46, n.3, march 1951, pp.213-245.

WOBBE, Goffredo. Intercambiabilitá dei Gas. L'Industria de Gas e degli Acquedotti, v.30, November 1926.

7. DIREITOS AUTORAIS

NEW DIMENSIONLESS NUMBER FOR THE COMBUSTION FENOMENA STUDY

Paulo Cesar da Costa PINHEIRO, Pinheiro@netuno.Lcc.ufmg.br, PauloCPinheiro@ufmg.br [1]
Borisas CIMBLERIS (1923-2000, *in Memoriam*)

[1] Dept. Engenharia Mecânica da UFMG, Av. Antonio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG

Abstract: *Don't exist in the scientific literature a dimensionless number for comparing the combustion of different gases. The Wobbe Index* $\boldsymbol{Iw = PCs_v / \sqrt{d}}$*, where* $\boldsymbol{PCs_v}$ *is the High Heat Value (volumetric), and* **d** *the relative density (compared to air) is not a dimensionless number, and compares 2 gas properties. In the Wobbe Index missing the parameters defining the kinetics of combustion, namely the pressure and speed. We analyzed the possible functional relationships in the homogeneous combustion, selecting relevant variables among the fuel gas properties, the burner geometry and kinetic properties such as the gas velocity. The dimensional analysis revealed some dimensionless groups* Π *not yet reported in the literature. These new dimensionless numbers may eventually be used as a comparison in the selection of combustible gases and the burners design. It is proposed as gas interchangeability criterion the dimensionless number:*

$$Pi = \frac{PCs_m}{V\sqrt{P/\rho}}$$

were $\boldsymbol{PCs_m}$ *is the high heat value (kJ/kg),* **V** *the gas velocity (m/s),* **P** *the gas pressure* (N/m^2) *and* $\boldsymbol{\rho}$ *the gas specific mass* (kg/m^3) *at normal condiction (0ºC, 1 atm).*

Keywords: *Combustion, gas intechambiability, Wobbe Index, dimensional analysis, dimensionless numbers*