



UMA PROPOSTA DE MODELO PARA O ENSINO DA TEORIA BÁSICA DA COMBUSTÃO

A PROPOSED MODEL FOR TEACHING BASIC COMBUSTION THEORY

Danilo de Souza¹, João Maria Soares²

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v45p15-32.2026

RESUMO: O presente trabalho propõe um modelo, com base em uma síntese da teoria básica apresentada em livros didáticos, para o ensino de reações teóricas elementares de combustão, incorporando considerações da literatura voltada à física da combustão. Foram realizadas generalizações para os casos de misturas pobres, ricas e estequiométricas, aplicando-se o modelo a hidrocarbonetos da forma C_nH_m e álcoois da forma $C_nH_{(2n+1)}OH$. Os resultados da aplicação matemática do modelo, além de corroborarem a literatura básica consultada, configuram-se como uma ampliação (ou complementação) do material didático para o ensino da teoria básica, quando utilizados para esse fim. No caso de misturas ricas, foi possível correlacionar limites para a formação de determinados produtos, em função dos elementos constituintes dos combustíveis modelados, aspecto não encontrado nos textos que abordam a teoria básica. Além disso, foi proposta uma aplicação didático-pedagógica do modelo, com potencial para aprimorar o material didático utilizado no ensino e, conseqüentemente, contribuir para a aprendizagem.

PALAVRAS-CHAVE: combustão; ensino; modelo.

ABSTRACT: This work proposes a model based on a synthesis of the basic theory from textbooks for teaching elementary theoretical combustion reactions, incorporating considerations from the literature on combustion physics. Generalizations were made for lean, rich, and stoichiometric mixtures, where the model was applied to hydrocarbons of the form C_nH_m and alcohols of the form $C_nH_{(2n+1)}OH$. The results of the mathematical application of the model, in addition to corroborating those of the consulted basic literature, can constitute an expansion (or complement) in terms of teaching material for the basic theory, if used. In the case of rich mixtures, limits for the formation of certain products could be correlated as a function of the constituent elements of the modeled fuels, which is not found in texts that address the basic theory. A didactic-pedagogical application of this model was also proposed, where an improvement in teaching materials is expected, which should consequently contribute to learning.

KEYWORDS: combustion; teaching; model.

¹ Prof. Me. no Instituto Federal do Rio Grande do Norte – Campus Mossoró, Doutorando em Física e Astronomia na Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, sodanilo.smarth@gmail.com

² Prof. Dr. na Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, joaosoares@uern.br



INTRODUÇÃO

Diversos cursos das áreas tecnológicas e das Ciências da Natureza no Brasil possuem componentes curriculares que tratam das reações teóricas elementares de combustão (IFPB, 2019; UFPR, 2019; IFRN, 2012; UFABC, 2016). Entre as principais fontes bibliográficas atualmente utilizadas nesses componentes curriculares, para o ensino da teoria básica de combustão, podem ser encontrados livros didáticos de termodinâmica, como, por exemplo, *Princípios de termodinâmica para engenharia* (Moran et al., 2016), *Termodinâmica* (Çengel e Boles, 2013) e *Fundamentos da termodinâmica* (Borgnakke e Sonntag, 2018). Quanto a abordagens mais avançadas, podem ser encontrados livros específicos sobre física da combustão, como *Fundamentals and Technology of Combustion* (El-Mahallawy; El-Din Habik, 2002) e *Combustion Physics* (Law, 2006).

A partir da leitura dos livros que abordam a teoria básica, foi observado que são feitas modelagens técnicas para os tipos teóricos de misturas: pobres (com excesso de ar), ricas (com deficiência de ar) e estequiométricas (com a quantidade exata de ar para queima completa). Entretanto, não foi observada uma formulação que contemple a definição dos produtos de combustão, para todos esses tipos, de forma completa.

Na abordagem de Moran et al. (2016), são apresentados exemplos de misturas estequiométricas e pobres, com produtos determinados pelo modelo utilizado (CO_2 , H_2O e N_2 , para o caso de misturas estequiométricas; e CO_2 , H_2O , N_2 e O_2 , para o caso de misturas pobres). Todavia, ao tratar de misturas ricas, os autores apenas mencionam que podem ser encontrados monóxido e dióxido de carbono, além de combustível não queimado, e não mencionam produtos exatos, como é feito no caso das misturas estequiométricas e pobres. Subsequentemente, nos problemas propostos, ao se trabalhar o modo de calcular o percentual teórico de ar, a partir de análises de produtos de combustão, é que começam a ser encontrados exemplos de misturas ricas.

Com uma abordagem análoga, Borgnakke e Sonntag (2018) também não apresentam exemplos iniciais com estabelecimento dos produtos de misturas ricas. Apesar disso, no livro, é mencionada a presença de monóxido de carbono nos produtos nesse tipo de mistura. Na abordagem de Çengel e Boles (2013) acontece algo semelhante. São apresentados variados exemplos com misturas pobres e estequiométricas. Entretanto, ao se abordar a teoria, apenas ocorre menção sobre a queima incompleta e alguns possíveis produtos destes casos. Novamente, não



evidenciam exemplos com estabelecimento dos produtos de combustão no caso de misturas ricas.

Uma formulação assim só foi observada em *Geração, Distribuição e Utilização de Vapor*, de Bizzo (2003); mesmo assim, de forma parcial ou limitada. Essa modelagem menciona que misturas ricas, mas suficientemente próximas da estequiométrica, são encontrados nos produtos CO_2 , CO , H_2O e N_2 . Entretanto, o modelo em questão não contempla o que aconteceria caso fosse diminuída mais ainda a proporção de ar (que produtos formariam ao se distanciar da dose estequiométrica), e o texto não menciona qual seria o limite para o uso desse modelo.

Como os textos supramencionados correspondem aos comumente utilizados para o ensino da teoria básica de combustão, a não formulação em questão pode comprometer o ensino dessa teoria em alguns aspectos. Considerando que os conteúdos constituem uma base objetiva da instrução (Libâneo, 2013), se um docente utiliza essas fontes como base para o trabalho desses conteúdos, as limitações do texto se relacionam diretamente ao ensino, seja na sequência didática, seja nas bases conceituais para compreensão dos conteúdos. Isso se constitui, portanto, em um problema educacional associado ao ensino da teoria básica, e, no caso específico, pode comprometer a compreensão de como a riqueza da mistura influencia nos produtos de combustão.

Adicionalmente a esse contexto, estudos como os de Félix e Madruga (2021) e Souza (2021) indicam que o ensino baseado em modelagens matemáticas pode ser eficaz nos mais variados níveis e para os mais diversos assuntos. Dessa forma, uma proposta de modelo – que, além de corroborar a teoria já encontrada na literatura base, contemple uma formulação que relaciona a riqueza da mistura com as possibilidades de produtos de combustão (agora, também, para o caso de misturas ricas) – pode se constituir como uma forma de mitigar o problema mencionado.

É exatamente nesse sentido que o presente trabalho propõe um modelo para o ensino da teoria básica de combustão. Foram realizadas leituras de livros mais avançados que abordam o tema e, a partir disso, o modelo foi concebido. Especialmente o livro de Law (2006), em uma abordagem sobre possibilidade de formação de carbono sólido nos produtos de misturas ricas, considerou o estabelecimento de uma ordem de formação específica entre água, dióxido e monóxido de carbono nos produtos da combustão. A presente proposta então a considerou e a incluiu como possibilidade para o caso do ensino da teoria básica.



Foi possível, a partir disso, uma formulação mais ampla, pois considerou também o estabelecimento dos produtos de combustão (e sua ordem de formação) nos casos de misturas ricas. Considerando ainda que, segundo Greca e Moreira (2021), os modelos mentais são basilares para se compreender as teorias, nas discussões do presente texto também foram utilizados, de forma exemplificativa, modelos mentais intuitivos de bolinhas. O objetivo disso foi associar como a implementação do modelo matemático em questão pode contribuir para a compreensão dos conteúdos, caso este modelo seja utilizado para o ensino da teoria básica.

Os resultados da formulação do modelo matemático-químico aqui proposto ainda não foram aplicados ao ensino. No entanto, o presente texto apresenta uma proposta de aplicação didático-pedagógica, a partir da qual se espera promover uma compreensão mais ampla das reações elementares, o que deve se constituir em um ganho para o ensino e, conseqüentemente, para a aprendizagem.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Reações elementares de combustão

Nas reações de combustão, são considerados como reagentes, basicamente, os combustíveis e o ar, podendo contaminações fazerem parte, por exemplo a fuligem e a umidade.

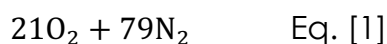
Uma queima é dita completa se todos os elementos que compõem os combustíveis forem oxidados completamente para formação dos produtos. Nesse caso, o carbono é queimado para formar dióxido de carbono (CO_2), o hidrogênio é queimado para formar água (H_2O) e, em caso de conter enxofre no modelo, ele é queimado para formar dióxido de enxofre (SO_2). Se qualquer parte desses sistemas não oxidar completamente, a queima é chamada de incompleta (Moran *et al.*, 2016; Çengel e Boles, 2013; Law, 2006).

Modelo para o ar

O ar é composto de uma mistura de diversos gases, como argônio (Ar), gás nitrogênio (N_2), gás oxigênio (O_2), gás carbônico (CO_2) etc. Além disso, pode conter impurezas como fuligem e aerossóis. Todavia, para a compreensão das reações elementares de combustão é feita uma modelagem para o ar, na qual se



considera que ele é puro e dotado de 79,0 % de gás nitrogênio e 21,0 % do gás oxigênio (Moran *et al.*, 2016; Çengel e Boles, 2013), conforme a Equação 1.



Uma notação simplificada é utilizada, comum e convencionalmente, de forma a manter as proporções desse modelo (Moran *et al.*, 2016; Çengel e Boles, 2013), conforme a Equação 2.



Nesse caso, a Equação 2 foi obtida pela divisão da Equação 1 por 79 (coeficiente do gás oxigênio, O_2 , da Equação 1), a fim de deixá-lo igual a um, pelo que deve ser mais fácil de se manipular matematicamente.

Modelos para os combustíveis

Os combustíveis modelados consistem basicamente em hidrocarbonetos, que podem ser parcialmente oxidados, conter enxofre em sua composição e/ou umidade e outros sistemas como fuligem. Seguem exemplos na Tabela 1.

Tabela 1 – Exemplos de Modelos para Combustíveis

Combustível	Modelo	Fórmula Química
Gasolina	Iso-Octano	C_8H_{18}
Óleo Diesel	Dodecano	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$
Gás Natural Veicular (GNV)	Metano	CH_4
Etanol	Álcool Etilico Anidro	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
Hidrogênio	Gás Hidrogênio	H_2

Fonte: adaptada de Moran *et al.* (2016) e Çengel e Boles (2013).

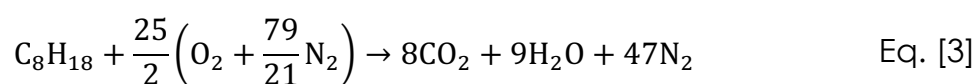
Entre os modelos básicos para os combustíveis mais comumente utilizados no Brasil, estão C_8H_{18} , $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ e $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. No presente trabalho, isso motivou o estudo de combustíveis da forma C_nH_m (no caso de hidrocarbonetos puros) e $\text{C}_n\text{H}_{(2n+1)}\text{OH}$ (no caso de álcoois).



Tipos de mistura

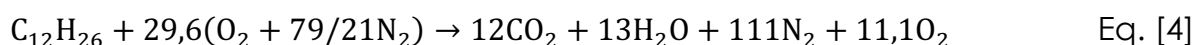
Quando ocorre uma reação modelada de combustão, as proporções entre as quantidades de ar e combustível podem variar. Nesse contexto, existem basicamente três tipos de misturas; são elas: estequiométrica, pobre e rica.

Na *mistura estequiométrica*, existe exatamente a quantidade mínima necessária de ar para que seu gás oxigênio (O_2) seja utilizado para queimar completamente os elementos do combustível. Um exemplo é a Equação 3:



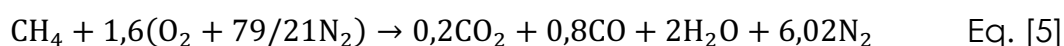
A Equação 3 é um exemplo de reação balanceada para a queima completa do modelo para a gasolina com mistura estequiométrica. Para ela, também pode ser usado o termo “com percentual teórico de ar” (Çengel e Boles, 2013), ou mesmo “mistura com 100% de ar teórico” (Moran *et al.*, 2016).

No caso da *mistura pobre*, além da quantidade mínima de ar para que seu gás oxigênio queime completamente os elementos do combustível, existe um excesso de ar, pelo que “sobra” gás oxigênio nos produtos. Exemplo é a Equação 4:



A Equação 4 apresenta uma reação balanceada (com aproximação para até três algarismos significativos) para a queima completa do óleo Diesel com 160% de ar teórico (ou com 60% de excesso de ar).

Em se tratando da *mistura rica*, não há oxigênio suficiente para a queima completa dos elementos do combustível (Moran *et al.*, 2016; Çengel e Boles, 2013). Segundo a teoria presente em Bizzo (2003), considerando misturas ricas e suficientemente próximas da estequiométrica, como resultado é formado monóxido de carbono nos produtos da combustão. Exemplo é a Equação 5:



A Equação 5 se refere a uma reação com mistura com 80% de ar teórico (20% de deficiência de ar).



Proporção entre as quantidades de combustível e de ar

Um importante parâmetro pertinente a este estudo diz respeito à relação entre as quantidades de combustível e de ar. A relação pode ser em termos de massa, por exemplo em (g de combustível)/(g de ar); ou em termos molares, por exemplo em (mol de combustível)/(mol de ar). Se for considerada a relação mássica, matematicamente é definida conforme a Equação 6:

$$\left(\frac{C}{A}\right)_{\text{mássica}} = \frac{m_{\text{comb.}}}{m_{\text{ar}}} \quad \text{Eq. [6]}$$

em que $m_{\text{comb.}}$ e m_{ar} correspondem, respectivamente, às massas de combustível e de ar.

Analogamente, a relação molar pode ser dada conforme a Equação 7:

$$\left(\frac{C}{A}\right)_{\text{molar}} = \frac{n_{\text{comb.}}}{n_{\text{ar}}} \quad \text{Eq. [7]}$$

em que $n_{\text{comb.}}$ e n_{ar} correspondem, respectivamente, ao número de mols de combustível e de ar.

A partir dessas relações, pode ser definido outro parâmetro imprescindível neste trabalho, chamado de riqueza da mistura (Martins, 2020). Essa variável também pode ser chamada de relação de aspecto ou de equivalência. Matematicamente, pode ser definida conforme a Equação 8:

$$\phi = \frac{\left(\frac{C}{A}\right)_{\text{mássica}}}{\left(\frac{C}{A}\right)_{\text{mássica teóric}}}} = \frac{\left(\frac{C}{A}\right)_{\text{molar}}}{\left(\frac{C}{A}\right)_{\text{molar teóric}}} \quad \text{Eq. [8]}$$

em que $\left(\frac{C}{A}\right)_{\text{mássica teóric}}$ e $\left(\frac{C}{A}\right)_{\text{molar teóric}}$ são, respectivamente, as relações mássicas e molar da reação com percentual teórico de ar (mistura estequiométrica) para o dado combustível.

Com base nas teorias de Moran *et al.* (2016), Çengel e Boles (2013), Borgnakke e Sonntag (2018), Law (2006), Bizzo (2003) e Martins (2020), existem duas abordagens possíveis para a manipulação dos reagentes (em misturas ricas ou pobres) a partir da mistura estequiométrica. Uma diz respeito a fixar uma quantidade combustível e fazer variar a quantidade proporcional de ar (Moran *et al.*; Çengel e Boles, 2013; Bizzo, 2003). A outra, por sua vez, mantém a quantidade

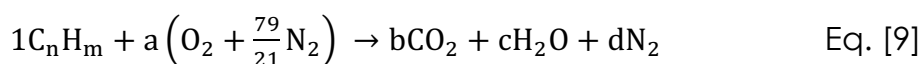


de ar e manipula a proporção de combustível (Law, 2006). Neste caso, utiliza-se a relação de aspecto. Essa foi a forma escolhida para a proposição do modelo do presente trabalho.

Misturas estequiométricas para hidrocarbonetos das formas C_nH_m e $C_nH_{(2n+1)}OH$

Para se manipular reações teóricas nos tipos rica e pobre, é imprescindível se conhecer primeiro a equação da reação estequiométrica balanceada para cada combustível modelado.

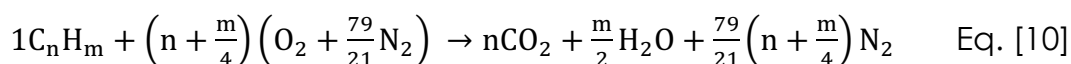
Considerando um combustível da forma C_nH_m , com $n, m \in \mathbb{N}^*$ (números naturais, exceto o zero), uma reação com percentual teórico de ar pode ser dada conforme a Equação 9:



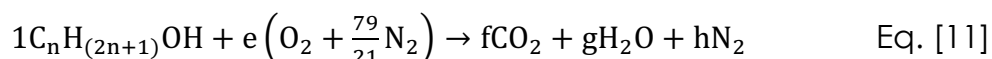
em que a, b, c e d são os coeficientes estequiométricos da reação química.

Pelo princípio da conservação da massa, é possível balancear a reação da Equação 9. Basta contar as quantidades de um mesmo elemento nos reagentes e nos produtos e depois igualar essas quantidades. Fazer isso para cada elemento possibilita encontrar os valores dos coeficientes estequiométricos.

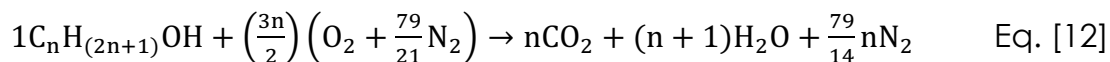
O resultado desse balanceamento aplicado à Equação 9 pode ser dado conforme a Equação 10:



De forma análoga, considerando um combustível da forma $C_nH_{(2n+1)}OH$, com $n \in \mathbb{N}^*$ (números naturais, exceto o zero), uma mistura com percentual teórico de ar pode ser dada conforme a Equação 11:



Aplicando o mesmo princípio do caso anterior (conservação da massa), é possível encontrar os valores e, f, g e h , e a equação da reação balanceada pode ser dada conforme a Equação 12:



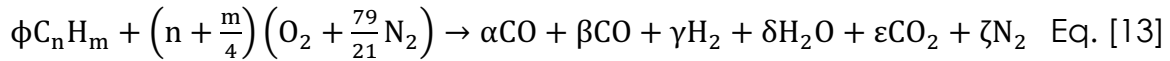
MODELO PROPOSTO

Foi realizada uma revisão dos conteúdos sobre reações teóricas elementares de combustão, baseada principalmente em Moran *et al.* (2016), Çengel e Boles (2013), Borgnakke e Sonntag (2018), Law (2006) e Bizzo (2003). A partir dela, o delineamento do modelo aqui proposto foi feito conforme os itens de (a) a (h), a seguir:

- (a) ar seco tem a forma $\left(O_2 + \frac{79}{21}N_2\right)$, que não apresenta qualquer quantidade de água (umidade), sendo o O_2 o único comburente da reação;
- (b) todo N_2 que existir nos reagentes foi considerado como inerte e, portanto, deve aparecer como tal nos produtos, isto é, não há formação de qualquer óxido de nitrogênio;
- (c) para o caso de mistura estequiométrica, os produtos da combustão são somente CO_2 , H_2O e N_2 ;
- (d) para o caso de misturas pobres, além dos sistemas que aparecem na queima estequiométrica, deve aparecer O_2 nos produtos;
- (e) para o caso de misturas ricas, foi considerado a seguinte ordem de formação de cada sistema conforme é aumentada a proporção de ar:
 - Primeiro sistema a ser formado: CO ;
 - Segundo sistema a ser formado: H_2O ;
 - Terceiro sistema a ser formado: CO_2 .
- (f) a mistura é considerada perfeitamente homogênea em todas as regiões da combustão;
- (g) todas as reações atingem a condição de serem iniciadas;
- (h) exclui-se a possibilidade de frações de combustível da forma que aparece nos reagentes resultar como não queimado nos produtos de combustão.

APLICAÇÃO DO MODELO A HIDROCARBONETOS DA FORMA C_nH_m

Considerando o resultado da Equação 10 para manipular a proporção entre ar e combustível, a partir do valor de ϕ , qualquer reação teórica elementar para a queima de C_nH_m pode ser dada conforme a Equação 13:

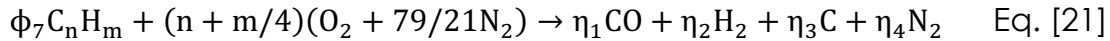
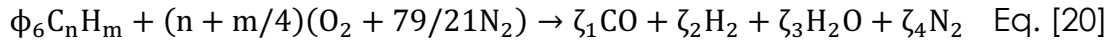
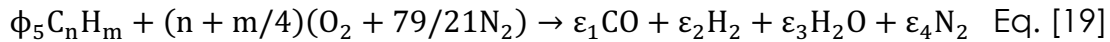
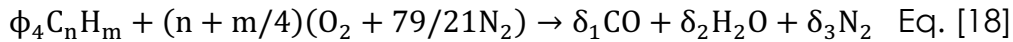
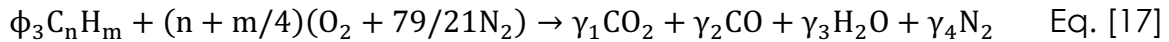
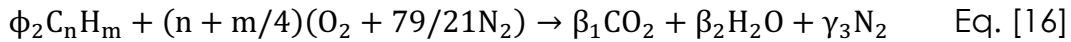
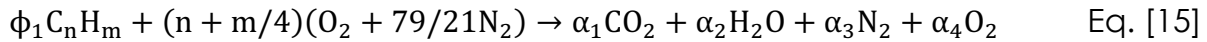


com $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ e $\zeta \in \mathbb{R}^+$ (números reais positivos, incluindo o zero).

A ideia básica diz respeito a considerar valores de $\phi = \phi_i \in \mathbb{R}_*^+$ (reais positivos, exceto o zero), com $i = 1, \dots, 7$ tais que (Equação 14):

$$\phi_1 < \phi_2 < \phi_3 < \phi_4 < \phi_5 < \phi_6 < \phi_7 \quad \text{Eq. [14]}$$

que resultem especificamente em determinados produtos de combustão, conforme as Equações de 15 a 21:



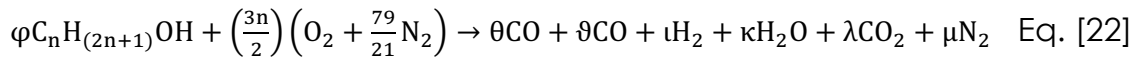
Nessa configuração, $\phi_2 = 1$, que corresponde à mistura com dosagem estequiométrica. Ademais, obviamente, para $\phi = \phi_1 < \phi_2$, a dosagem da mistura é pobre. Para o restante dos possíveis valores de ϕ , é considerada a ordem de queima estabelecida por Law (2006), com seus respectivos produtos possíveis.

A partir da aplicação do princípio da conservação da massa (mesmo método aplicado para os cálculos das Equações 10 e 12, foram calculados os possíveis valores de ϕ_i . Os resultados serão discutidos em uma seção posterior.



APLICAÇÃO DO MODELO A ÁLCOOIS DA FORMA $C_nH_{(2n+1)}OH$

De forma análoga ao caso anterior, qualquer reação teórica elementar para a queima de $C_nH_{(2n+1)}OH$ pode ser dada conforme a Equação 22:

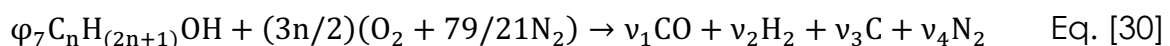
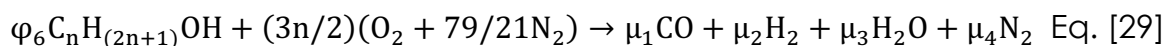
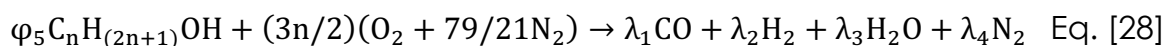
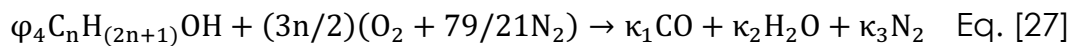
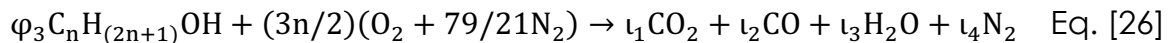
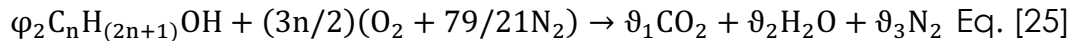
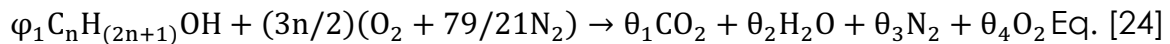


com $\theta, \vartheta, \iota, \kappa, \lambda$ e $\mu \in \mathbb{R}^+$ (números reais positivos, incluindo o zero).

Também de forma análoga, considerando valores de $\varphi = \varphi_i \in \mathbb{R}_*^+$ (reais positivos, exceto o zero), com $i = 1, \dots, 7$, tais que (Equação 23):

$$\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3 < \varphi_4 < \varphi_5 < \varphi_6 < \varphi_7 \quad \text{Eq. [23]}$$

que resultem especificamente em determinados produtos de combustão, conforme as Equações de 24 a 30:



Também foi aplicado o princípio da conservação da massa, dessa vez para o cálculo dos possíveis φ_i . Os resultados serão discutidos na seguinte seção.



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a aplicação do modelo proposto e o princípio da conservação da massa, puderam ser correlacionados valores de graus de riqueza de mistura, ϕ_i , com os possíveis produtos de combustão em função dos valores de n e m de hidrocarbonetos da forma C_nH_m , conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Graus de Riqueza da Mistura, ϕ_i , em Função de n e m , para Hidrocarbonetos da Forma C_nH_m .

Tipo de mistura	Produtos (gases de combustão).	Grau de riqueza da mistura, ϕ_i .
Pobre	CO_2, H_2O, N_2 e O_2	$0 < \phi_1 < 1$
Estequiométrica	CO_2, H_2O e N_2	$\phi_2 = 1$
	CO_2, CO, H_2O e N_2	$1 < \phi_3 < \frac{4n+m}{2n+m}$
	CO, H_2O e N_2	$\phi_4 = \frac{4n+m}{2n+m}$
Rica	CO, H_2O, H_2 e N_2	$\frac{4n+m}{2n+m} < \phi_5 < \frac{4n+m}{2n}$
	CO, H_2 e N_2	$\phi_6 = \frac{4n+m}{2n}$
	CO, H_2, C e N_2	$\phi_7 > \frac{4n+m}{2n}$

Fonte: elaborada pelos autores.

Quanto aos casos de misturas pobres e estequiométricas, os resultados corroboram os da literatura já comumente utilizada para o trabalho desses conteúdos (Moran *et al.*, 2016; Çengel e Boles, 2013; Borgnakke e Sonntag, 2018).

No caso de misturas ricas, os valores de $\phi = \phi_3$ corroboram os presentes em Bizzo (2003), ao se referir a misturas ricas, mas suficientemente próximas de estequiométricas. Adicionalmente, esse resultado permite estabelecer um limite para a abordagem utilizada por Bizzo (2003), que é o valor de $\phi_4 = \frac{4n+m}{2n+m}$.

A partir desse valor, a mistura é tão rica que apresenta oxigênio insuficiente não só para queimar completamente parte do carbono, mas também parte do hidrogênio, gerando os produtos CO, H_2O, H_2 e N_2 .

Ao enriquecer ainda mais a mistura, outro limite apareceria, que seria $\phi_6 = \frac{4n+m}{2n}$. A partir deste, tem tão pouco gás oxigênio que só se consegue queimar uma pequena parte do carbono; mesmo assim, incompletamente, gerando os produtos CO, H_2, C e N_2 . No limite em que os valores de riqueza tendem ao infinito, as reações tendem a não acontecer por falta de comburente.



Essa parte conteudal pode se mostrar importante para o ensino sobre os diferentes graus de riqueza, pelo que não somente se consegue dividir nos tipos pobre, rica, ou estequiométrica, mas também possibilita compreender (mesmo que intuitivamente) como isso pode influenciar nos casos de misturas ricas.

Todavia, a aplicação desse modelo também pode apresentar determinadas limitações, como pode se inferir, a partir dos resultados para os álcoois da forma $C_nH_{(2n+1)}OH$, presentes na Tabela 3.

Tabela 3 – Grau de Riqueza da Mistura, φ_i , em Função de n e m , para Álcoois da Forma $C_nH_{(2n+1)}OH$.

Tipo de mistura	Produtos (gases de combustão).	Grau de riqueza da mistura, φ_i .
Pobre	CO_2, H_2O, N_2 e O_2	$0 < \varphi_1 < 1$
Estequiométrica	CO_2, H_2O e N_2	$\varphi_2 = 1$
	CO_2, CO, H_2O e N_2	$1 < \varphi_3 < 3/2$
Rica	CO, H_2O e N_2	$\varphi_4 = 3/2$
	CO, H_2O, H_2 e N_2	$\frac{3}{2} < \varphi_5 < \frac{3n}{n-1}$
	CO, H_2 e N_2	$\varphi_6 = \frac{3n}{n-1}$
	CO, H_2, C e N_2	$\varphi_7 > \frac{3n}{n-1}$

Fonte: elaborada pelos autores.

No caso de misturas pobre e estequiométricas de álcoois da forma $C_nH_{(2n+1)}OH$, os resultados também corroboraram os dos livros didáticos comumente utilizados para o ensino da teoria básica. Adicionalmente, pode ser observado que a teoria presente em Bizzo (2003) ficaria restrita a valores de riqueza entre um e um e meio.

Outro resultado importante foi que, para riquezas maiores que $3/2$, esse modelo não pode ser utilizado para o caso do metanol, pois é uma condição necessária que (Equação 31):

$$n - 1 \neq 0 \Rightarrow n \neq 1 \quad \text{Eq. [31]}$$

Para exemplificar esses resultados, suponha os modelos para gasolina, óleo Diesel, GNV e etanol. Os valores de riqueza estariam conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Intervalos de Riqueza para cada conjunto de produtos

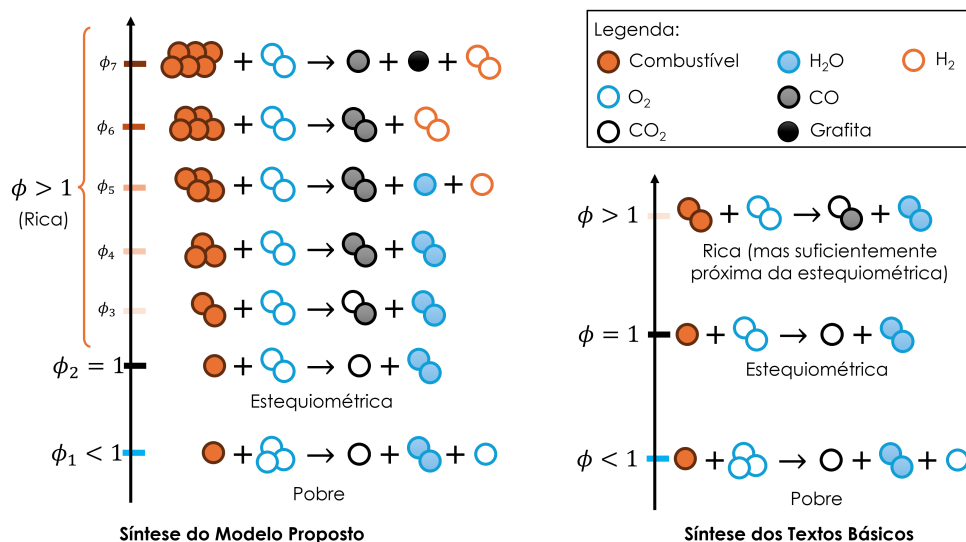
Combustível	CO ₂ , CO, H ₂ O e N ₂	CO, H ₂ O, H ₂ e N ₂	CO, H ₂ , C e N ₂
Gasolina	$1 < \phi_3 < 1,47$	$1,47 < \phi_5 < 3,125$	$3,125 < \phi_7$
Óleo Diesel	$1 < \phi_3 < 1,48$	$1,48 < \phi_5 < 3,08$	$3,08 < \phi_7$
GNV	$1 < \phi_3 < 1,33$	$1,33 < \phi_5 < 4$	$4 < \phi_7$
Etanol	$1 < \phi_3 < 1,5$	$1,5 < \phi_5 < 6$	$6 < \phi_7$

Fonte: elaborada pelos autores.

A primeira coluna se refere aos limites da teoria abordada por Bizzo (2003), para misturas ricas. As colunas seguintes poderiam, de forma complementar ou incremental, contribuir para compreensão dos limites de riqueza e possíveis produtos de combustão nesse tipo de mistura. Nesse contexto, a aplicação do modelo aqui proposto pode permitir uma compreensão mais ampla de como a riqueza da mistura influencia no processo de combustão, pela compreensão do que aparece nos seus produtos.

Possibilidade de correlação com modelos mentais

Greca e Moreira (2021) apresentaram uma abordagem em que se considerou que os modelos mentais devem preceder e servem para compreender bem os modelos matemáticos e a teoria. Um exemplo de representação, em termos do que Greca e Moreira (2021) chamaram de modelos mentais, que poderia ser utilizado neste estudo está na Figura 1:

Figura 1 – Exemplo de possível modelo mental com representação de bolinhas

Fonte: elaborada pelos autores.



Na representação da Figura 1, o gás nitrogênio não foi considerado, para fins de simplificação, e a representação em termos de ϕ e ϕ_i (associada a combustíveis da forma C_nH_m) é análoga em termos de φ e φ_i (associada a combustíveis da forma $C_nH_{(2n+1)}OH$).

Com base nessa representação, a noção de que a riqueza da mistura influencia nos produtos de combustão tem potencial para ser complementada (ou ampliada), com uso do modelo aqui proposto. Em termos práticos, seria algo como não apenas aparecer gás oxigênio "sobrando", no caso de misturas pobres, e monóxido de carbono, no caso de misturas ricas, mas o complemento de que, em misturas muito ricas, pode não formar água e aparecer carbono (provavelmente na forma de grafita, fuligem) nos produtos. Ou seja, podem aparecer variações mesmo dentro desse tipo de mistura e existe um limite para caso já encontrado na literatura básica (no caso, o texto de Bizzo [2003]). Isso já não acontece, por outro lado, no caso de misturas pobres, pois o aumento da pobreza só provocaria o aparecimento de mais gás oxigênio nos produtos.

A seguir é feita uma proposta de aplicação do presente modelo para o ensino e potencial consequente aprendizagem dos conteúdos de reações elementares de combustão.

Proposta de aplicação didático-pedagógica

Público-alvo

Uma proposta de aplicação do presente modelo matemático-químico pode ter como público-alvo discentes de cursos técnicos (e/ou tecnológicos), cujos componentes curriculares abarquem o conteúdo de reações elementares de combustão (ou similares), que corresponde à teoria básica.

Objetivos de aprendizagem

Para além da compreensão de que existem três tipos de mistura, segundo as proporções de ar e de combustível nos reagentes, e que, para cada caso, são formados diferentes produtos de combustão, espera-se levar à compreensão de que o grau de riqueza também faz variar os produtos de combustão no caso de misturas ricas.



Estratégia didática

Em uma primeira fase, a partir da teoria já existente na literatura básica, devem ser feitas atividades iniciais com aulas teórico-expositivas e/ou pesquisas bibliográficas e exercícios propostos. Entre as atividades de exercícios propostos, deve haver exemplos com graus de riqueza que extrapolam os limites da teoria de misturas ricas, mas suficientemente próximas da estequiométrica, proposta por Bizzo (2003). De forma análoga, deve conter exemplos de misturas muito pobres. Ao final dessa etapa, há que se avaliar a aprendizagem sobre como a riqueza da mistura influencia nos produtos da combustão em cada tipo de mistura.

Deverá ficar evidenciado com isso que, no caso de misturas pobres, o aumento da proporção de ar nos reagentes apenas fará aparecer mais gás oxigênio, sobrando nos produtos de combustão. Por outro lado, o sistema linear formado no caso de misturas ricas não será possível de ser resolvido, evidenciando que o modelo existente para a teoria básica não contempla uma formulação completa para misturas ricas, assim como já existe nos livros básicos para os casos de misturas estequiométricas e pobres.

Em uma segunda fase, podem ser realizadas atividades com aulas teórico-expositivas, baseadas no modelo aqui proposto. Além disso, devem ser propostas resoluções de exercícios nos quais possam ser retomadas as questões que, segundo o modelo de Bizzo (2003), eram impossíveis de serem resolvidas. Ao final dessa etapa, há que se realizar uma avaliação análoga a que foi feita na primeira fase. A partir dos resultados dessas avaliações, deve-se analisar se houve contribuições para aprendizagem em termos dos objetivos iniciais planejados.

Uma hipótese é que, com o uso do complemento do modelo aqui proposto, os discentes poderão compreender melhor como a variação das proporções entre ar e combustível influencia nos produtos de combustão, podendo, adicionalmente, contribuir para que seja compreendida a teoria básica já existente. Entretanto, as contribuições reais da aplicação do modelo só deverão ser verificadas após a sua aplicação prática, o que poderá ser feito em um trabalho posterior.

Implicações educacionais

As bases conceituais dos conteúdos de ensino têm relação direta com os processos de ensino e de aprendizagem (Libâneo, 2013). Uma limitação de conteúdo (ou, associativamente, base conceitual) pode comprometer tanto a



compreensão do docente, ao estudar e planejar seu ensino, como também do discente, que deverá aprender o que for ensinado e/ou os conteúdos existentes na literatura utilizada. Nesse sentido, um modelo matemático como o aqui proposto, que complemente a teoria básica, tem potencial para melhorar os processos de ensino e de aprendizagem. Seu uso pode, no contexto da teoria básica de reações elementares de combustão, ampliar a compreensão de como a riqueza da mistura influencia nos produtos de combustão. Ademais, levar à compreensão de que cada tipo de mistura apresenta seus respectivos produtos de combustão; no caso específico de misturas ricas, esses produtos podem variar também segundo o grau de riqueza. Sendo assim, empregar este modelo no ensino da teoria básica (mesmo que de forma complementar) deverá implicar em um ganho para o ensino e, conseqüentemente, para a aprendizagem sobre o tema.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A formulação do modelo proposto no presente trabalho contempla completamente os conteúdos da literatura básica consultada, em todos os tipos de mistura (pobre, rica e estequiométrica), para os combustíveis modelados como C_nH_m (hidrocarbonetos puros) e $C_nH_{(2n+1)}OH$ (álcoois puros).

Do ponto de vista da contribuição técnica, sua formulação permitiu esclarecer o limite para o uso da teoria de Bizzo (2003), para os casos de misturas ricas, mas suficientemente próximas da estequiométrica. Além disso, permitiu estabelecer limites para a formação de outros sistemas, em misturas ricas, seguindo a ordem de formação estabelecida por Law (2006).

Do ponto de vista da contribuição para o ensino, no caso de seu uso como material didático complementar, o modelo pôde correlacionar não só os tipos de mistura (pobre, rica ou estequiométrica) em função do seu grau de riqueza, mas também indicar, nos casos de misturas ricas, o que pode aparecer nos produtos como função deste. Seu uso pode, portanto, implicar em uma ampliação na compreensão das reações elementares de combustão; ou seja, a aplicação do modelo, embora ainda não sido feita, apresenta potencial para melhoras no ensino e, conseqüentemente, na aprendizagem sobre a teoria básica de combustão.



REFERÊNCIAS

- BIZZO, W. A. **Geração, Distribuição e Utilização de Vapor**. Apostila de curso. São Paulo: UNICAMP, 2003.
- BORGNACKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica**. Tradução da 8ª edição norte-americana. Coordenação e tradução de Roberto de Aguiar Peixoto. São Paulo: Blucher, 2018.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. Tradução de Paulo Maurício Costa Gomes; revisão técnica de Antonio Pertence Júnior. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- EL-MAHALLAWY, F.; HABIK, S. E-D. **Fundamentals and Technology of Combustion**. Oxford: Elsevier, 2002.
- FÉLIX, V.; MADRUGA, Z. E. F. A Modelagem Matemática no Ensino de Física. **Revista Eletrônica Científica Ensino Interdisciplinar**. Mossoró, v. 7, n. 21, 2021.
- GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physics. **Science Education**, v. 86, p. 106-121, dez. 2021.
- IFRN. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Projeto Pedagógico do Curso Técnico de Nível Médio em Mecânica na forma Subsequente, na modalidade presencial, Rio Grande do Norte: IFRN, 2012. p. 56-57. Disponível em: https://portal.ifrn.edu.br/documents/865/Tecnico_Subsequente_em_Mecanica_2012.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.
- IFPB. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. Projeto Pedagógico do Curso (PPC): Bacharelado em Engenharia Mecânica. João Pessoa: IFPB, 2019, p. 173-174. Disponível em: https://estudante.ifpb.edu.br/media/cursos/219/atos_regulatorios/resolucao-no-30CS.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.
- LAW, C. K. **Combustion Physics**. Nova York: Cambridge University Press, 2006.
- LIBÂNEO, J. C. **Didática**. 2. ed. São Paulo: Cortez, 2013.
- MARTINS, J. J. G. **Motores de combustão interna**. 7. ed. rev. e aum. Porto: Quântica editora, 2020.
- MORAN, M. J. *et al.* **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Tradução de Gisele Maria Ribeiro. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- SOUZA, E. S. R. de. Efeitos de um ciclo de modelagem no contexto do ensino de física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 38, n. 1, p. 600-627, abr. 2021.
- UFABC. Universidade Federal do ABC. Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia de Energia. Santo André: Universidade Federal do ABC, p. 120-121, 2016. Disponível em: https://prograd.ufabc.edu.br/cg/OD3_PPC_energia_disciplinas_03_2016.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.
- UFPR. Universidade Federal do Paraná. Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia de Energia, Palotina: UFPR, 2019, p. 214-215. Disponível em: https://palotina.ufpr.br/energiaufpr/wp-content/uploads/sites/16/2021/09/PPC_Eng_Energia-2019_compressed.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.