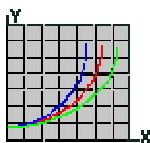


# Web site de foguetaria experimental de Richard Nakka



## Teoria de motor-foguete sólido

### 11 GUIPEP

#### 11.1 Introdução

Esta Web Page é destinada a servir como uma introdução ao aplicativo **GUIPEP**, que é basicamente o aplicativo PROPEP (versão para computador pessoal do Programa de Avaliação de Propelente – *Propellant Evaluation Program*) com a inclusão de uma Interface Gráfica de Usuário (GUI – *Graphical User Interface*) para simplificar muito o uso do aplicativo. Este aplicativo termoquímico altamente útil permite ao usuário avaliar o desempenho teórico de um propelente sólido (ou líquido). Desta forma, ele é particularmente útil para conferir a viabilidade de possíveis formulações de propelente. Assim como, ele permite ao usuário determinar rapidamente as razões mais efetivas de ingredientes para obter o desempenho desejado, de uma perspectiva teórica.

O GUIPEP é basicamente um solucionador de *equilíbrio químico*, isto é, ele ajusta as equações químicas relacionando os reagentes e produtos do propelente por um método conhecido como “minimização da energia livre de Gibbs”. Os ingredientes (reagentes) que definem o propelente são transformados adiabaticamente e irreversivelmente nos constituintes dos produtos das reações em quantidades fixadas pelas relações de equilíbrio, pressão na câmara, e balanço de massa em uma temperatura de reação fixada pela energia de reação disponível. O conjunto resultante de produtos fornece as bases para calcular as propriedades termodinâmicas, a partir das quais os parâmetros de desempenho são determinados por um processo iterativo que considera as variações das propriedades e composição dos produtos.

A entrada é simplesmente uma lista dos ingredientes (e a massa de cada) do propelente, bem como a pressão na câmara e pressão na saída da tubeira. A saída do aplicativo inclui a temperatura de combustão, expoente isentrópico, massa molecular dos produtos, temperatura e composição na exaustão, impulso específico, e a razão ideal de expansão. Notar que os parâmetros da taxa de queima *não* são avaliados, já que a taxa de queima é um fenômeno complexo que envolve muitos outros processos físicos ao lado da combustão, tais como a transferência de calor e massa entre a chama da reação e a superfície de queima do propelente.

Outro aplicativo termoquímico similar é o CET (Equilíbrio Químico com Propriedades de Transporte – *Chemical Equilibrium with Transport Properties*, NASA TM 4557), mas até agora, que eu saiba, nenhum GUI está disponível para este aplicativo. Desta forma, ele é incômodo para usar. As predições são quase idênticas àsquelas do GUIPEP, baseadas em minhas experiências limitadas com o uso deste aplicativo.

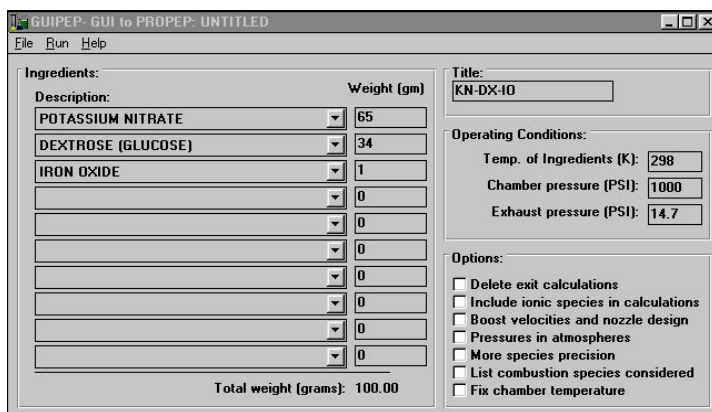
#### 11.2 Hipóteses de Análise

Muitas das hipóteses básicas empregadas pelo solucionador são aquelas descritas no Capítulo 2 Hipóteses Básicas:

- Escoamento unidimensional em relação às equações da massa, energia e quantidade de movimento
- Velocidade do escoamento nula na entrada da tubeira
- Combustão completa e adiabática
- Expansão isentrópica na tubeira
- Mistura homogênea dos reagentes e produtos
- Aplica-se a lei do gás ideal
- Atraso nulo da temperatura e velocidade dos produtos da fase condensada

### 11.3 Usando o GUIPEP

O GUIPEP (Figura 11.1) é muito fácil de usar. Até 10 ingredientes do propelente são escolhidos em caixas com listas, e a massa (em gramas) é entrada. A massa total não precisa ser adicionada até 100 gramas, mas isto é a forma mais conveniente de entrar os dados, já que então a massa representa a *percentagem* daquele constituinte particular. Para eliminar qualquer ingrediente indesejado, zero é entrado como a massa.



#### Tradução:

File: arquivo  
 Run: executar a simulação  
 Help: ajuda  
 Ingredientes: ingredientes  
 Description: descrição  
 POTASSIUM NITRATE: nitrato de potássio  
 Weight (gm): massa em gramas  
 Total weight (grams): massa total em gramas  
 Title: título  
 Operating Conditions: condições de operação  
 Temp. of Ingredients (K): temperatura dos ingredientes em Kelvin  
 Chamber pressure (PSI): pressão na câmara em PSI  
 Exhaust pressure (PSI): pressão na saída da tubeira em PSI

**Figura 11.1** Janela principal do aplicativo GUIPEP com um exemplo de dados de entrada.

Um **Título** para a execução da simulação é então entrado, e pode ser de até 10 caracteres de extensão. As **Condições de Operação** são geralmente deixadas com os valores *default*, a menos que haja alguma razão particular para modificá-las:

- Temperatura dos ingredientes = 298 K (que é a temperatura ambiente de 25 °C)
- Pressão na câmara = 1000 psi (que é a pressão de referência na qual o  $I_{sp}$  é citado)
- Pressão de exaustão = 14,7 psi (que é uma atmosfera, a condição de expansão ideal ao nível do mar)

Em relação às **Opções**, nenhuma precisa ser escolhida para avaliação básica de propelente. Contudo, se o projeto da tubeira está sendo estudado, selecione a caixa *Boost Velocities and Nozzle Design*.

O passo final é executar o aplicativo pela seleção de *Run* (executar), e então *Single Run* (execução única). Uma janela DOS então aparece para permitir a execução do aplicativo, que é iniciado ao clicar na tecla *Enter*. O aplicativo Notepad (bloco de notas) da MicroSoft então aparece, no qual a saída é mostrada.

A janela de um exemplo de entrada no GUIPEP é mostrada na Figura 11.1.

## 11.4 Resultados do GUIPEP

A porção inicial da saída é basicamente um eco dos dados completos de entrada, como mostrado na Figura 11.2. Alguns dos dados de entrada são automaticamente extraídos do arquivo *pepcoded.daf*, que é um arquivo texto que contém os seguintes dados de ingredientes:

- [Código do ingrediente]
- Nome do ingrediente
- Fórmula química
- “Calor de formação” (que é realmente a variação da entalpia de formação), em calorias/grama
- Massa específica, em libras/polegada cúbica [e gramas/centímetro cúbico]

```

File Edit Search Help
■ KN-DX-10 Run using June 1988 Version of PEP,
Case 1 of 1 11 Aug 2001 at 9:14:10.68 pm

CODE WEIGHT D-H DENS COMPOSITION
821 POTASSIUM NITRATE 65.000 -1169 0.07670 1N 30 1K
1093 DEXTROSE (GLUCOSE) 34.000 -1689 0.05670 6C 12H 6O
541 IRON OXIDE 1.000 -1230 0.18400 3O 2FE

THE PROPELLANT DENSITY IS 0.06884 LB/CU-IN OR 1.9056 GM/CC
THE TOTAL PROPELLANT WEIGHT IS 100.0000 GRAMS

NUMBER OF GRAM ATOMS OF EACH ELEMENT PRESENT IN INGREDIENTS
2.264628 H 1.132314 C 0.642877 N 3.079730 O
0.642877 K 0.012523 FE
  
```

Tradução:

Figura 11.2 Exemplo de dados do aplicativo GUIPEP no arquivo de saída.

Estes dados estão refletidos na Figura 11.2 acima, onde D-H é a “variação da entalpia de formação”, DENS é a massa específica de cada ingrediente, e COMPOSITION é a fórmula química. A massa específica ideal resultante do propelente também é fornecida, e é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\rho_p = \frac{1}{\frac{f_a}{\rho_a} + \frac{f_b}{\rho_b} + \frac{f_c}{\rho_c} + \dots} \quad (11.1)$$

como detalhado no Capítulo 3 Grão-Propelente.

Por exemplo:  $DENS = 1 / (0,65/0,0767 + 0,34/0,0567 + 0,01/0,184) = 0,06884 \text{ lb/in}^3 = 1,9056 \text{ g/cm}^3$

O número de átomos-grama de cada elemento presente nos ingredientes é então listado. Basicamente, isto indica relativamente quantos *átomos* de cada elemento estão presentes no caldeirão de ingredientes que são combinados para formar os produtos da combustão. Embora isto é a informação chave para o solucionador, para o usuário ele não tem utilidade. Para referência, isto é calculado como a razão entre a massa e a massa molecular para um ingrediente particular, multiplicado pelo número de moles de um elemento particular, somado para cada ingrediente.

A porção seguinte dos resultados apresenta as **condições na câmara de combustão**, como mostrado na Figura 11.3.

A primeira linha indica a **temperatura de combustão** (em Kelvin e graus F), a **pressão na câmara** [em atm e psi] como especificado, a **entalpia** total da mistura (kcal/massa do sistema), a **entropia** total do sistema (cal/K/massa do sistema), **CP/CV**, que é a razão entre os calores específicos, **GAS** (número de moles do gás na mistura), e **RT/V** (um fator de conversão que normalmente não é usado). Notar que a massa do sistema neste exemplo é 100 gramas.

```

*****CHAMBER RESULTS FOLLOW *****
T(K)  T(F)  P(ATM)  P(PST)  ENTHALPY  ENTROPY  CP/CV  GAS  RT/U
1733.  2659.  68.02   1000.00  -134.64   163.44   1.1280  2.297  29.614

SPECIFIC HEAT (MOLAR) OF GAS AND TOTAL=  10.801  15.381
NUMBER MOLES GAS AND CONDENSED=  2.2970  0.3179

0.87508 H2O      0.41818 CO2    0.40865 CO      0.32138 N2
0.30541 K2CO3*  0.24164 H2     0.03037 KHO     0.01242 FeO*
1.30E-03 K      1.70E-04 K2H2O  8.55E-05 FeH2O2  6.85E-05 NH3
1.80E-05 H      1.05E-05 KH    4.87E-06 KCN    3.75E-06 HO
2.13E-06 CH2O   2.12E-06 CH4   1.63E-06 CNH

THE MOLECULAR WEIGHT OF THE MIXTURE IS  38.243

```

Tradução:

Figura 11.3 Exemplo de resultados do aplicativo GUIPEP para a câmara de combustão.

Os únicos parâmetros importantes aqui são:

- **Temperatura de combustão** – Também denotada por *Temperatura Adiabática de Chama*, e determinada pelo método descrito no Capítulo 4 Combustão do Propelente. Geralmente, quanto maior é a temperatura, maior é o impulso específico. Contudo há dois fatores do “mundo real” a considerar. Maiores temperaturas requerem materiais mais robustos na estrutura e na tubeira, revestimentos isolantes ou ablativos. Notar que a temperatura na câmara é a *temperatura de estagnação* que a tubeira “verá” e deve ser projetada para. Temperaturas de combustão baixas, como previstas por este aplicativo, podem não ser auto-sustentáveis na realidade. Por exemplo, uma formulação com uma temperatura na câmara prevista de 1000 K provavelmente não queimará completamente.
- **CP/CV** - A razão entre os calores específicos ( $k$ ) para a mistura nas condições da câmara de combustão, este é o valor correto para usar quando calcular a *velocidade característica* ( $c_{estrela}$ ) e a *pressão na câmara*, como descrito nos capítulos anteriores. O valor de CP/CV é calculado com as seguintes equações:

$$k = \frac{C_{p-mix}}{C_{p-mix} - R'} \quad (11.2)$$

onde

$$C_{p-mix} = \frac{1}{n} \sum_i (n_i C_{p-i} + n_s C_s) \quad (11.3)$$

com os detalhes sobre a notação e o uso das equações dadas na [Web Page Bloco de Notas Técnico](#).

- **GAS** – O número de moles dos produtos gasosos da combustão na mistura produzida (que também pode conter fase condensada). Este valor é usado para calcular a massa molecular efetiva  $M$  da mistura produzida, que é calculada pela razão entre a massa do sistema e o número de moles do gás. Para este exemplo,  $M = 100 / 2,297 = 43,54$  g/mol. Este é o valor da massa molecular adequado a usar nas equações da dinâmica dos gases descrito nos capítulos anteriores.

A linha seguinte fornece os valores do **calor específico molar** dos produtos gasosos e da mistura (cal/mol/K), e são fornecidos somente para referência.

A linha seguinte fornece os valores do número de **moles do gás** (repetido) e o número de **moles dos produtos na fase condensada**, que pode ser sólido ou líquido. Esta informação é de interesse, já que ela fornece a razão (molar) dos produtos gás/fase condensada.

As linhas seguintes dos resultados apresentam o número de **moles de cada constituinte dos produtos da combustão**. Os nomes dos produtos seguidos por \* são fase líquida, e & designa fase sólida; todos os outros estão na fase gasosa. Estes resultados permitem ao usuário calcular a *fração mássica de fase condensada*, que é dada pela massa total da fase condensada dividida pela massa do sistema, e onde a massa de cada constituinte é dada pelo número de moles multiplicado pela massa molecular daquele constituinte.

Por exemplo: fração mássica da fase condensada =  $(0,30541 \times 138,2 + 0,01242 \times 71,9) / 100 = 0,422$

Muitos dos produtos da combustão estão em quantidades muito pequenas, e tem uma importância insignificante no processo global. Do exemplo acima, os únicos produtos importantes são H<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub> e talvez KOH e FeO.

Para um melhor desempenho, são desejáveis produtos de baixa massa molecular, portanto a massa molecular efetiva da mistura deve ser minimizada. Produtos com baixa massa molecular no exemplo acima são H<sub>2</sub>O, H, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, NH<sub>3</sub> e OH.

A linha seguinte na Figura 11.3 fornece a massa molecular da mistura (algumas vezes denotada por *MW*), que é dada pela soma da fração molar de cada constituinte multiplicada pela sua massa molecular, como mostrado abaixo:

$$M_{mix} = \sum_i f_{m-i} M_i \quad (11.4)$$

Este valor da massa molecular deve ser desconsiderado já que ele não tem utilidade em relação ao desempenho do foguete.

A porção seguinte dos resultados apresenta as **condições na exaustão da tubeira**, como mostrado na Figura 11.4. O formato destes resultados é idêntico àqueles da câmara. Os valores representam as condições no *plano de saída* da tubeira.

```
*****EXHAUST RESULTS FOLLOW*****
T(K)  T(F)  P(ATM)  P(PST)  ENTHALPY  ENTROPY  CP/CV  GAS  RT/U
1169.  1646.  1.00    14.70   -161.60   163.44   1.1325  2.266  0.441

SPECIFIC HEAT (MOLAR) OF GAS AND TOTAL=  9.969  14.803
NUMBER MOLS GAS AND CONDENSED=  2.2656  0.3334

  0.77686 H2O      0.51521 CO2      0.35490 H2      0.32141 N2
  0.32090 K2CO3&  0.29614 CO      0.01250 FeO&   0.00101 KHO
  4.62E-05 K      1.17E-05 NH3    2.42E-06 CH4   1.75E-06 K2H2O2

THE MOLECULAR WEIGHT OF THE MIXTURE IS  38.475
```

Tradução:



Figura 11.4 Exemplo de resultados do aplicativo GUIPEP na saída da tubeira.

Alguns pontos são destacados:

- A temperatura dos produtos da combustão caiu significativamente, já que a energia térmica foi convertida em energia cinética. A temperatura na saída ( $T_e$ ) pode ser calculada com a Equação 5.7 do Capítulo 5 Teoria de Tubeira:

$$T_e = \frac{T_o}{1 + \frac{k-1}{2} M_e^2} \quad (11.5)$$

onde

$$M_e = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[ \left( \frac{P_o}{P_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad (11.6)$$

onde  $T_o$  é a temperatura na câmara,  $P_o/P_e$  é a razão entre a pressão na câmara e a pressão na saída da tubeira,  $M_e$  é o número de Mach do escoamento na saída, e  $k$  é o CP/CV para as condições de exaustão. Notar que o valor dado na saída é para as condições de *equilíbrio alterado* que é explicado posteriormente.

- A pressão da câmara caiu a uma atmosfera, a condição de projeto.
- Ambos CP/CV e o número de moles do gás mudaram levemente, refletindo a mudança de composição e a temperatura da exaustão com o escoamento através da tubeira.
- Igualmente, os calores específicos e o número de moles das espécies condensadas mudaram a partir das condições na câmara.
- A composição dos produtos mudou de uma forma interessante. Notar que há menos constituintes com *quantidades pequenas*. Isto acontece porque a temperatura é menor e ocorre menos dissociação (quebra em moléculas mais simples) dos compostos maiores. Também notar que os produtos líquidos mudaram para a fase sólida.

A porção seguinte dos resultados apresenta o **Desempenho** de um motor-foguete equipado com este propelente e tubeira como especificado, e mostrado na Figura 11.5. O desempenho é dado para ambas as condições de equilíbrio **Congelado** e **Alterado**. **O que estes termos significam?** Equilíbrio congelado significa que a composição química da exaustão **não muda** com o escoamento através da tubeira (a composição dos produtos é estabelecida na câmara de combustão). O equilíbrio alterado assume que o equilíbrio químico instantâneo é estabelecido quando o gás expande através da tubeira, “mudando” continuamente a composição.

*****PERFORMANCE: FROZEN ON FIRST LINE, SHIFTING ON SECOND LINE*****										
IMPULSE	IS EX	T*	P*	C*	ISP*	OPT-EX	D-ISP	A*M	EX-T	
151.6	1.1326	1625.	39.31	2967.9	10.22	288.9	0.09227	1057.		
153.2	1.1058	1647.	39.63	3025.2	114.3	10.82	291.9	0.09405	1169.	

Tradução:

Figura 11.5 Exemplo de resultados do aplicativo GUIPEP para o desempenho do motor-foguete.

**Por que ambos os resultados são fornecidos?** Porque devido ao tempo de residência curto na tubeira, é incerto se há ou não tempo suficiente para as reações químicas realmente ocorrerem como predito pelo modelo de equilíbrio alterado. A geometria também tem sua importância, já que tuberas mais compridas fornecem mais tempo de residência.

**Quais resultados a usar?** Para motores amadores, nos quais as tuberas são muito pequenas em comparação com foguetes profissionais grandes, eu considero o modelo de escoamento congelado

ser o mais realístico. Para a tubeira do motor-foguete Kappa, eu calculei em 430 microsegundos a duração do tempo para o escoamento passar através da tubeira!

Na Figura 11.5, a primeira linha apresenta o Impulso Específico ideal (IMPULSE), o expoente isentrópico (IS EX), a temperatura do escoamento na garganta ( $T^*$ ) e a pressão na garganta ( $P^*$ ), a velocidade característica ( $C^*$ ), o impulso no vácuo ( $ISP^*$ ), a razão de expansão ótima (OPT-EX),  $I_{sp}$  de densidade (D-ISP), a razão entre a área da garganta e o fluxo de massa ( $A^*M$ ), e a temperatura no plano de saída (EX-T).

A seguir está uma breve discussão destes resultados:

- O **Impulso Específico Ideal** é a “régua” chave do desempenho potencial, e pode ser considerada relacionar o *empuxo produzido por unidade de massa* (por exemplo 1 lb ou kg) de propelente sobre o *tempo de queima de um segundo*. O Impulso Específico ideal pode ser determinado com a Equação 7.7 do Capítulo 7 Impulso e C-Estrela:

$$I_{sp} = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{2kT_o}{k-1} \left(\frac{R'}{M}\right) \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_o}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \quad (11.7)$$

onde  $k$  é considerado como a média do CP/CV para as condições na câmara e exaustão, e  $M$  como a média da massa molecular efetiva para as condições na câmara e exaustão.

- O **expoente isentrópico** é o mesmo que  $k$  ou CP/CV para um gás perfeito tal que  $PV^k =$  constante ( $P =$  pressão;  $V =$  volume). Como o gás não é perfeito, os valores de IS EX e CP/CV não são iguais.
- **$T^*$  e  $P^*$**  são os chamados valores *críticos* da temperatura e pressão do escoamento onde a velocidade do escoamento é Mach um, isto é, na garganta. Eles podem ser calculados com as Equações 5.7 e 5.9 do Capítulo 5 Teoria de Tubeira. As unidades são Kelvin e atmosferas, respectivamente.

$$T^* = \frac{T_o}{1 + \frac{k-1}{2}} \quad (11.8)$$

$$P^* = \frac{P_o}{\left(1 + \frac{k-1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}} \quad (11.9)$$

- **$C^*$**  é a Velocidade de Exaustão Característica (*c-estrela*), com unidades de pés/segundo. Este parâmetro pode ser considerado uma figura de mérito termoquímica para um propelente particular, e é dado pela Equação 7.3 do Capítulo 7 Impulso e C-Estrela:

$$c^* = \sqrt{\frac{T_o R' / M}{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (11.10)$$

- **ISP\*** é o impulso no vácuo que seria obtido por uma tubeira sônica funcionando em um motor aspirando ar, e portanto pode ser ignorado.
- **OPT-EX**, a Razão de Expansão Ótima ( $A_e/A_t$ ) é um parâmetro importante no projeto de tubeira. Este valor define a razão entre a área de saída da tubeira e a área da garganta, e assim, dimensiona o diâmetro de saída do cone divergente, onde

$$D_e = D_t \sqrt{\frac{A_e}{A_t}} \quad (11.11)$$

Esta razão [OPT-EX] pode ser determinada com a Equação 5.17 do Capítulo 5 Teoria de Tubeira:

$$\frac{A_e}{A^*} = \frac{1}{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{P_e}{P_o}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\left(\frac{k+1}{k-1}\right) \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_o}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}} \quad (11.12)$$

onde  $k$  é o valor de CP/CV para as condições de exaustão.

- O Impulso Específico de Densidade (**D-ISP**) é um parâmetro interessante. Ele é definido como o produto do impulso específico pela gravidade específica do propelente, ou

$$I_d = I_{sp} \delta_p \quad (11.13)$$

onde a gravidade específica é numericamente igual à massa específica, em  $\text{g/cm}^3$ . Um valor alto de  $I_{sp}$  de densidade seria importante para projetos de motores compactos, onde o volume é difícil de obter.

- **A\*M** (“A-estrela M”) é a razão entre a área da garganta da tubeira e o fluxo de massa expresso como polegada<sup>2</sup>-segundo/libra. I realmente não sei o que isto significa e para que usar ...!
- **EX-T** é a temperatura (Kelvin) no plano de saída da tubeira e pode ser determinada com a Equação 11.5.

## 11.5 Comparação das Equações de Desempenho com o GUIPEP

A Tabela 11.1 mostra uma comparação interessante entre os resultados apresentados pelo GUIPEP e os mesmos resultados calculados pelo uso das equações de desempenho apresentadas neste capítulo, que são consideradas “aproximadas”. Apesar disso, os resultados estão em concordância muito próxima.

## 11.6 Limitações do GUIPEP

Em alguma medida, a acurácia dos resultados é dependente do arquivo JANNAF.DAT que contém dados do calor de formação das espécies nas reações usadas pelo solucionador. A lista das espécies é limitada no escopo, e para combinações incomuns de propelentes, os produtos reais da reação podem não estar presentes na lista. O resultado é uma falha do solucionador, ou resultados



inacurados. Um bom exemplo é o propelente Zinco-Enxofre, para o qual o GUIPEP não fornece qualquer solução. A razão disso é que o produto principal da combustão, sulfeto de zinco, não está presente na lista de espécies de reação.

**Tabela 11.1 Comparação das equações de desempenho com o GUIPEP.**

Parâmetro		Equação	Calculado	GUIPEP	Unidade
Velocidade característica	$c^*$	11.10	2966	2968	pés/s
Impulso específico	$I_{sp}$	11.7	151,1	151,6	s
Razão de expansão ótima	$A_e/A_t$	11.12	10,22	10,22	adim.
Temperatura crítica	$T^*$	11.8	1629	1625	K
Pressão crítica	$P^*$	11.9	39,38	39,31	atm
Temperatura no plano de saída	$T_e$	11.5	1058	1057	K

Como mencionado na introdução, a *taxa de queima* do propelente não é avaliado pelo GUIPEP, não há qualquer indicação fornecida como ou se o preparo de um propelente particular será *auto-consumível*. Embora é óbvio que este tipo de avaliação está além do escopo ou pretensão do GUIPEP, isto de fato deve ser mantido em mente quando se avaliar um propelente. Os propelentes a base de nitrato de amônia são um bom exemplo. Embora o GUIPEP tipicamente apresente números intensos de desempenho, na realidade, a taxa de queima é geralmente tão baixa que o propelente se auto-extingue. Também, a adição de metais tais como alumínio melhora significativamente o desempenho para muitos propelentes, de acordo com os resultados do GUIPEP. Isto geralmente não é o caso na realidade, onde muitos dos metais ficam sem queimar exceto se a temperatura de reação do propelente é muito alta e o tamanho das partículas de metal é muito fina. Limitações físicas também podem anular um propelente potencialmente promissor. O carregamento de sólidos pesados frequentemente é predito melhorar o desempenho, mas na prática, é geralmente difícil obter devido às limitações de adesão dos aglomerantes.

Outra limitação, ou defeito, se relaciona à predição do desempenho de propelentes com percentagem significativa de partículas na fase condensada na exaustão (escoamento bifásico). O valor de CP/CV e o expoente isentrópico usado pelo solucionador do GUIPEP para determinar todos os parâmetros de desempenho são calculados para uma *mistura* gás-partícula, como mostrado na Equação 9.2 do Capítulo 9 Escoamento Bifásico. Contudo, para o escoamento através da tubeira, um expoente isentrópico modificado deve ser usado, como dado pela Equação 9.3. Para propelentes com uma fração mínima de fase condensada (digo, < 10%), o efeito global é provavelmente desprezível. Mas para um propelente como o KN-Açúcar, onde a fração de fase condensada é muito alta (44%), o efeito líquido é mais significativo. Como um exemplo, o valor na câmara do expoente isentrópico como calculado pela Equação 9.3 é  $k = 1,04$ , enquanto que o valor dado pela Equação 9.2 e GUIPEP é  $k = 1,13$ . A diferença no Impulso Específico Ideal é  $I_{sp} = 166$  s versus  $I_{sp} = 153$  s, respectivamente.