

# Investigação Teórica de um Resistojato Catalítico Usando Peróxido de Hidrogênio como Propelente

Tiago dos Santos Ramos e Fernando de Souza Costa

Laboratório Associado de Combustão e Propulsão – LCP, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Rod.: Presidente Dutra, km 40, Cep.: 12630-000, Cachoeira Paulista – S.P., Brasil.

**Resumo** — Resistojatos catalíticos são propulsores elétricos que geram empuxos da ordem de 1 N. São constituídos de um sistema de aquecimento elétrico e de um leito catalítico usados para aquecer e decompor o propelente, antes de sua ejeção a altas velocidades por uma tubeira. O estudo apresentado analisa os efeitos da adição de calor e da concentração do propelente em um propulsor usando peróxido de hidrogênio como propelente. Uma análise teórica simplificada é desenvolvida para o escoamento ao longo do propulsor, determinando-se parâmetros de desempenho como temperatura dos produtos de decomposição, empuxo e impulso específico.

**Palavras-Chave** — Propulsão Líquida, Resistojato, Leito Catalítico, Peróxido de Hidrogênio.

## I. INTRODUÇÃO

Os resistojatos catalíticos são propulsores eletrotérmicos, que utilizam uma fonte externa de energia elétrica e um catalisador para aquecer e decompor o propelente antes da sua ejeção por uma tubeira. Apresentam baixo empuxo (~1N) e são adequados para manobras que requerem grande precisão como: correção de órbita e manutenção de atitude de satélites e sondas e espaciais [1].

Os modelos mais simples de propulsores eletrotérmicos são os resistojatos [2], tendo como vantagens a facilidade de controle, o condicionamento de potência simples, a possibilidade do emprego de propelentes inertes, projeto de baixo custo e boa eficiência de empuxo, na faixa de 60 a 85% [3].

Os resistojatos são propulsores versáteis no emprego de propelentes, porém o propelente dever ser escolhido de acordo com a necessidade da missão. Os propelentes utilizados podem ser: H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, He, H<sub>2</sub>O, Xe, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [4].

Nas últimas décadas o interesse pelo peróxido de hidrogênio em propulsão aumentou consideravelmente, principalmente por ser um propelente não tóxico comparado com a hidrazina. Atraindo assim atenção da comunidade científica para aplicações em propulsores de baixo e médio empuxo.

Este artigo apresenta um estudo teórico de um propulsor resistojato catalítico empregando peróxido de hidrogênio como propelente, com objetivo de obter uma relação ótima entre a potência fornecida, a concentração do propelente e o volume de catalisador empregado.

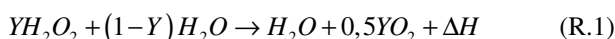
Tiago, [tiago@lcp.inpe.br](mailto:tiago@lcp.inpe.br), Tel +55-12-31869482, Fax +55-12-31011992, Fernando, [fernando@lcp.inpe.br](mailto:fernando@lcp.inpe.br), Tel. +55-12-91869215, Fax +55-12-31011992.

## II. PROPELENTE

Soluções aquosas de peróxido de hidrogênio em concentrações de 80 a 95% em massa são interessantes para aplicações em propulsão, pois se decompõem exotermicamente (~1000 K), apresentam alta densidade (1,25~1,45 kg/l) em relação a outros propelentes líquidos. Possui alto ponto de ebulição (395~423 K) e baixa viscosidade (1,2~1,25 Centipoises). Apesar de o ponto de congelamento ser relativamente alto (208~303 K), o que é uma desvantagem para algumas aplicações em ambientes frios, como estágios superiores ou operações em locais com baixas temperaturas, esta característica pode ser modificada pela introdução de nitrato de amônio na solução, sem que haja mudanças significativas na performance [5].

A alta densidade do peróxido de hidrogênio possibilita o uso de tanques menores e, portanto mais leves em relação a outros oxidantes. É um propelente não criogênico, apresenta decomposição relativamente baixa, de cerca de 1% ao ano, facilitando assim seu armazenamento e manuseio [6].

A decomposição do peróxido de hidrogênio se dá basicamente em água e oxigênio. Para simular a reação de decomposição do peróxido na câmara e o escoamento na tubeira utilizou-se o programa CEA NASA 2004 [11], notou-se que a fração molar de produtos dissociados, ou secundários, apresentou-se irrelevante da ordem de 10<sup>-6</sup>. Portanto a reação de decomposição pode ser resumida a (R.1):



onde Y é a fração mássica de peróxido de hidrogênio na solução aquosa.

Algumas propriedades do peróxido de hidrogênio são apresentadas na Tabela I.

TABELA I. ALGUMAS PROPRIEDADES DO H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> PURO.

Peso molecular [kg/mol]	34,01
Ponto de ebulição [K]	423
Ponto de fusão [K]	272,26
Temperatura crítica [K]	728
Pressão crítica [bar]	220
Entalpia de formação (líquido) [kJ/mol]	-187,17
Calor específico (líquido) [J/mol K]	89,1
Entalpia de formação (gás) [kJ/mol K]	-136,11
Calor específico (gás) [J/mol K]	43,1
Densidade [kg/l]	1,44

Fonte : [7].

### III. CATALISADORES

Na literatura consta que o pioneiro no uso de catalisadores em sistemas propulsivos foi Walter na década de 1930 [8], utilizando um leito catalítico para decompor o  $H_2O_2$  com fins propulsivos como no famoso V-2. Os catalisadores mais estudados atualmente são de prata, permanganatos de metais alcalinos e óxidos de manganês (basicamente  $MnO_2$  e  $Mn_2O_3$ ). Existem algumas experiências com platina depositada sobre alumina, dióxido de rutênio, pentóxido de divanádio e óxido de chumbo. Nenhuma destas soluções é livre de problemas: no caso da prata o problema principal é a limitação de temperatura e o envenenamento; no caso de catalisadores cerâmicos, a pulverização e a resistência; no caso de leitos de materiais compactados (pellets), a resistência excessiva ao escoamento; e no caso de catalisadores suportados em matrizes pode ocorrer a estratificação do escoamento [9].

A temperatura de decomposição catalítica depende da concentração da solução aquosa de peróxido de hidrogênio, conforme mostra a Fig. 1.

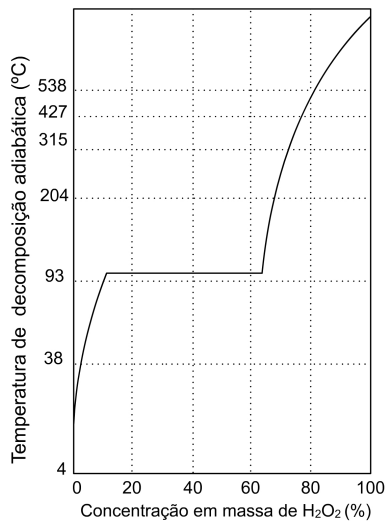


Fig. 1. Temperatura de decomposição adiabática versus percentual em massa de  $H_2O_2$ , a 1 atm. [6].

O catalisador que será utilizado neste projeto será o  $Ir/Al_2O_3$ , produzido no laboratório do LCP (Laboratório associado de Combustão e Propulsão), este catalisador é conhecido como LCP 33R, que possui características semelhantes ao catalisador norte americano US 405 [10].

### IV. PARÂMETROS PROPULSIVOS

Neste trabalho busca-se analisar o desempenho teórico de um propulsor resistojato catalítico empregando uma solução aquosa de peróxido de hidrogênio como propelente, visando obter dados preliminares para o projeto de um protótipo.

O desempenho do propulsor vai depender da eficiência do catalisador, da eficiência térmica, da concentração do reagente e das temperaturas de aquecimento (na entrada da câmara). Serão apresentados a seguir alguns parâmetros de desempenho teórico do propulsor em função da potência elétrica aplicada.

Para avaliar o propulsor, alguns parâmetros devem ser mensurados como o empuxo, o impulso específico, a

velocidade característica, coeficiente de empuxo e a velocidade de exaustão.

As equações a seguir serão representadas de forma simplificada [3].

O empuxo,  $F$ , de um propulsor pode ser calculado pela expressão:

$$F = \dot{m}v_e + (p_e - p_a)A_e \quad (1)$$

onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica,  $v_e$  é a velocidade de exaustão,  $p_e$  é a pressão de exaustão,  $p_a$  é a pressão ambiente e  $A_e$  é a área de exaustão no bocal da tubeira.

Considerando uma razão de expansão ( $\epsilon = A_e/A_g$ ),  $A_g$  é a área da garganta, da tubeira ótima, isto é, tal que  $P_e = P_a$ , (1) pode ser simplificada, tornando-se:

$$F = \dot{m}v_e \quad (2)$$

O impulso específico,  $I_{sp}$ , é dado por uma relação entre o empuxo e a quantidade em peso do propelente consumido, o impulso específico é dado por:

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}g_0} \quad (3)$$

onde  $g_0$  é a aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

A velocidade característica,  $c^*$  é um parâmetro relacionado à qualidade do propelente e à qualidade de projeto da câmara, sendo definida por:

$$c^* = \frac{p_c A_g}{\dot{m}} \quad (4)$$

onde  $p_c$  é a pressão na câmara.

O coeficiente de empuxo,  $C_F$ , é um parâmetro que determina a qualidade do projeto da tubeira, sendo definido por:

$$C_F = \frac{F}{\dot{m}p_c} \quad (5)$$

A temperatura dos produtos de decomposição é obtida no final da câmara termo-catalítica, antes dos gases de decomposição serem ejetados a altas velocidades pelo convergente-divergente da tubeira.

Aplicando a primeira lei da termodinâmica para o escoamento ao longo da tubeira, tem-se [4]:

$$h_c = h_e + \frac{v_e^2}{2} \quad (6)$$

onde  $h_c$  é a entalpia de estagnação na saída da câmara termo-catalítica.

Usando o calor específico médio,  $c_p$ , da mistura na tubeira, com  $h_e = h_f + c_p(T_e - T_o)$  e  $h_c = h_f + c_p(T_c - T_o)$ , onde  $h_f$  é a entalpia de formação, obtém-se a velocidade de exaustão,  $v_e$ :

$$v_e = \sqrt{2c_{p,m}(T_c - T_e)} \quad (7)$$

onde  $T_c$  é a temperatura dos produtos de decomposição,  $c_{p,m}$  é o calor específico médio dos produtos a pressão constante na tubeira e  $T_e$  é a temperatura de exaustão.

Para simplificação dos cálculos foram admitidas as seguintes condições:

O fluido obedece à lei dos gases perfeitos (na tubeira);

O escoamento é adiabático para o meio externo, exceto o efeito da adição de energia térmica provida da resistência ôhmica ao escoamento;

Os efeitos de atrito e camada limite são desprezados;

Escoamento é unidimensional e em regime permanente;

Escoamento é isentrópico na tubeira.

Para obter os resultados teóricos presentes na próxima seção foi necessário aplicar conceitos como: a conservação da massa, do momento, da energia e as equações termodinâmicas que possibilitam avaliar as propriedades termodinâmicas do escoamento. Assim foi possível obter dados teóricos que serão utilizados em uma futura comparação com os dados experimentais que serão obtidos com o protótipo apresentado na Fig. 5.

## V. RESULTADOS

As características propulsivas de um resistojato catalítico empregando uma solução aquosa de peróxido de hidrogênio foram determinadas com a utilização das equações apresentadas na seção anterior, empregando-as em um algoritmo escrito em linguagem Matlab e como suporte para avaliação dos dados utilizou-se o programa CEA NASA 2004 [11].

Com os dados obtidos foi possível gerar curvas da temperatura final na câmara termo-catalítica,  $T_c$ , do impulso específico,  $I_{sp}$ , e do empuxo,  $F$ , versus a potência elétrica fornecida,  $P$ , para uma dada vazão de propelentes. Considerou-se o caso com decomposição total simples na câmara termo-catalítica e equilíbrio químico na tubeira, adotando-se a pressão na câmara termo-catalítica  $p_c = 5$  bar, temperatura de entrada dos propelentes  $T_i = 298$  K e eficiência térmica  $\eta = 90\%$ .

As Fig. 2, 3 e 4 mostram, respectivamente, a temperatura dos produtos de decomposição na câmara termo-catalítica, o impulso específico e o empuxo, considerando o escoamento na câmara com decomposição e equilíbrio químico, a reação na câmara termo-catalítica ocorre em tempo suficiente para que a decomposição do reagente seja completa. Neste caso considera-se que a tubeira é adaptada, com razão de expansão igual a 1,45, para realização de testes em bancada, a cerca de 600 m de altitude em relação ao nível do mar. O escoamento na tubeira foi considerado congelado, isto é, a composição do escoamento ao longo da tubeira permanece idêntica à composição no fim da câmara termo-catalítica. A vazão mássica considerada para o escoamento foi de 0,2 g/s, pressão ambiente  $p_a = 0,95$  bar, média da pressão ambiente para a altitude de trabalho da bancada de testes.

Com o fornecimento de calor ao escoamento observa-se que os parâmetros propulsivos tendem a aumentar de forma proporcional ao aquecimento, ou seja, com o aumento da potência fornecida haverá aumentos nas temperaturas, nos impulsos específicos e empuxos.

Para os gráficos a seguir será admitido equilíbrio químico na câmara e escoamento congelado na tubeira (adaptada), para diversas concentrações do propelente.

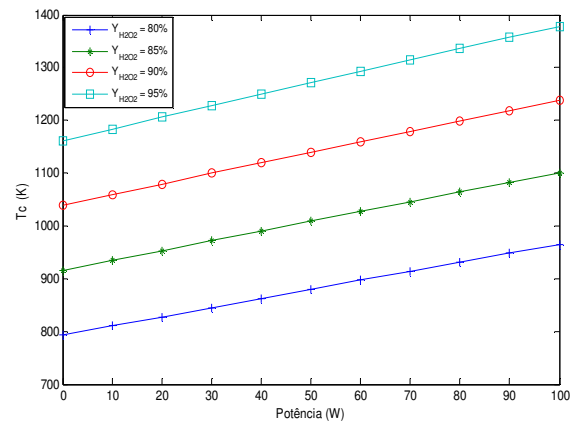


Fig. 2. Temperatura da câmara termo-catalítica versus potência elétrica fornecida.

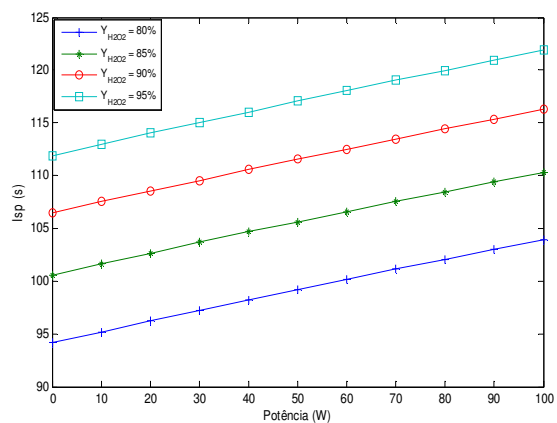


Fig. 3. Impulso específico versus potência elétrica fornecida.

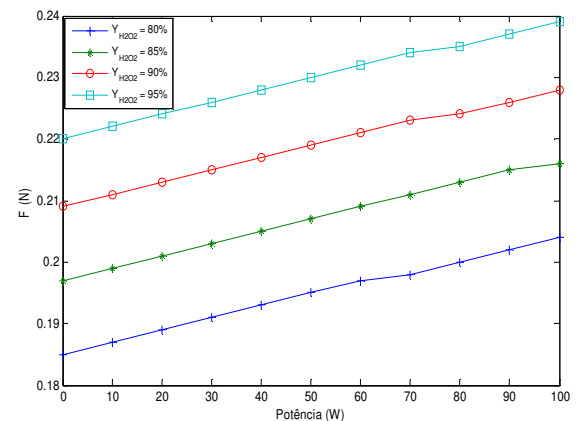


Fig. 4. Empuxo versus potência elétrica fornecida.

Os resultados apresentados servem de base para o pré-dimensionamento de um resistojato catalítico, permitindo que posteriormente ocorra a comparação dos resultados teóricos com os experimentais, determinando assim as eficiências dos parâmetros propulsivos. Alguns valores de referência para o protótipo do resistojato catalítico são mostrados na Tabela II, considerando as médias dos dados teóricos.

A Tabela II apresenta valores de referência para projeto de um resistojato catalítico com uma solução aquosa de 95% em massa de peróxido de hidrogênio.

TABELA II. VALORES DE REFERÊNCIA

Potência Máxima [W]	100
Pressão na Câmara [bar]	5
Vazão mássica [g/s]	0,2
Empuxo Máximo [N]	0,25
Coefficiente de Empuxo [-]	1,24
Impulso Específico [s]	137
Razão de Expansão $\epsilon$ [-]	1,45
Diâmetro da Garganta [mm]	0,7
Eficiência Térmica [%]	90

O motor será dotado de isolamento térmico para impedir o aquecimento da célula de carga. A resistência elétrica foi confeccionada na forma de um cartucho para fornecer uma potência de até 100W em um volume reduzido e centralizado no propulsor. A mesma é constituída de um filamento interno de níquel-cromo isolado com óxido de magnésio e protegida por um tubo de aço. Também possui um termopar interno para controlar a temperatura do filamento aquecedor que é limitada a 700 °C.

No LCP há uma bancada para testes de propulsores eletrotérmicos que irá sofrer modificações, pois em trabalhos anteriores o sistema de alimentação operava com óxido nitroso (gás), para trabalhar com a solução aquosa de peróxido de hidrogênio será necessário alterar o medidor e controlador de vazão, assim como o sistema de pressurização do propelente e a disposição das placas flexíveis de sustentação do propulsor.

Na Fig. 5 apresenta o protótipo do propulsor usinado na oficina do LCP a partir dos dados apresentados acima.

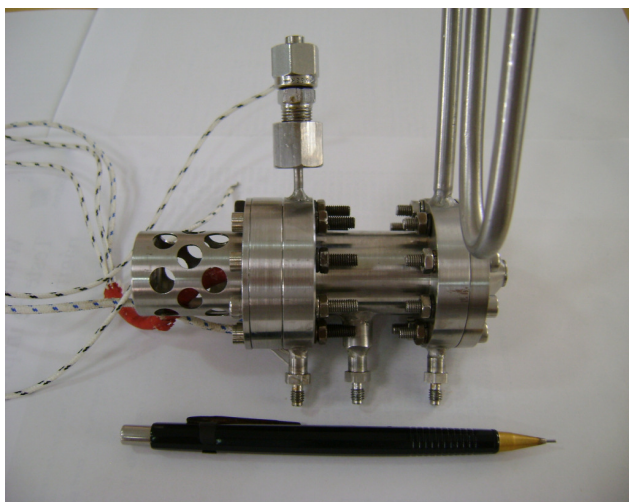


Fig. 5. Protótipo.

Este protótipo possui 8 cm de comprimento e 4,8 cm de diâmetro, na Fig. 5 acima é possível observar as entradas dos termopares abaixo, acima o injetor e a atrás a resistência elétrica.

## VI. CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu uma análise teórica simplificada do desempenho de um resistojet catalítico utilizando uma solução aquosa de peróxido de hidrogênio como monopropelente. Resistojetos são propulsores utilizados com o intuito de obter uma maior eficiência na utilização da massa de propelente, tornando possível o aumento da massa de carga útil.

Foram desenvolvidos modelos para descrever o processo de aquecimento com fornecimento de energia e com decomposição catalítica, considerando a decomposição completa do peróxido de hidrogênio em água e oxigênio.

Foram apresentados os parâmetros de performance do propulsor e analisados os efeitos da adição de energia térmica e da concentração do propelente sobre a temperatura final na câmara termo-catalítica, o empuxo e o impulso específico do propulsor.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] Hoole R., "Resistojet demonstration model (in Dutch, MSc thesis)", Delft University of Technology, 1990.
- [2] Turner, M. J. L., Rocket and Spacecraft Propulsion, Principles, Practice and New Developments. 3th edition., Chichester-UK, Springer-Praxis, 2009.
- [3] Sutton G and Biblarz O., Rocket Propulsion Elements. 6th edition, John Wiley and Sons Inc, 2001.
- [4] Jahn, R. G.; Choueiri, E. Y., Physics of Electric Propulsion, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [5] Davis Jr, N. S., Keefe, J. H., "Concentrated Hydrogen Peroxide as a Propellant". Industrial and Engineering Chemistry, v.48, n.4, p. 745-748 Szabo J., "Advances in electrostatic propulsion: ion and Hall thrusters at the Aerospace Corporation", AIAA 95 -3544, 1956.
- [6] Gouvêa, L. H., "Análise de desempenho de um motor híbrido utilizando parafina e peróxido e hidrogênio como propelentes", 2007. 169 p. (INPE-15389-TDI/1406). Dissertação (Mestrado em Propulsão e Combustão) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.
- [7] E., CRC Handbook of Chemistry and Physics, 89th Edition (Internet Version 2009), CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL, 2009.
- [8] Tian, H., Zang, T., Sun, X., Liang, D., and Lin, L., "Performance and deactivation of Ir/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in the hydrogen peroxide monopropellant thruster, 2001.
- [9] Pasini A., Torre L., Romeo L., Cervone A., d'Agostino L., Musker A. J., Saccoccia G., "Experimental Characterization of a 5 N Hydrogen Peroxide Monopropellant Thruster Prototype", 43<sup>rd</sup>, AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit AIAA 2007-5465 Sutton G and Biblarz O., 1992, Rocket Propulsion Elements. 6th edition, John Wiley and Sons Inc, 2007. David, R. Lide, Neto Soares, T. G., Gobbo-Ferreira, J., Cobo, A. J. G., and Cruz G. M., "Ir-Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts used in satellite propulsion", Brazilian Journal of chemical Engineering, Vol. 20, No. 03, pp.213- 282, July-September 2003.
- [11] CEA - Chemical Equilibrium with Applications. Cleveland, OH: Glenn Research.Center-NASA. <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/CEAWeb/ceaguiDownload-win.htm>> Acesso em: 20 maio 2009.