



## Propelentes sólidos para foguetes - Avaliação da geração de gases tóxicos com base nas reações de combustão

**Rafaela Baldissera <sup>1</sup>, Larissa Gabriel <sup>1</sup>, Matheus Poletto <sup>1</sup>**

<sup>1</sup> CENT - Universidade de Caxias do Sul – UCS (mpolett1@ucs.br)

### Resumo

Atualmente os propelentes sólidos utilizados como combustíveis para foguetes geram grandes quantidades de gases tóxicos durante sua queima. A queima destes combustíveis acarreta o aumento da concentração de gases que contribuem para o efeito estufa. O crescente aumento das atividades na área espacial vem impulsionando o desenvolvimento de propulsores ambientalmente amigáveis. Este trabalho tem como objetivo comparar a quantidade teórica de gases gerados durante a combustão de um propelente comumente utilizado em foguetes de curto alcance com a quantidade de gases gerada a partir de um propelente ambientalmente amigável. Assim, comparou-se a quantidade teórica de gases gerados com a combustão de propelente a base de sacarose e nitrato de potássio (KNSu) com a quantidade teórica de gases gerados com a queima de um propelente sólido a base de nanopartículas de alumínio e gelo (ALICE). Os resultados demonstraram que com KNSu a liberação de gás carbônico é da ordem de 175g CO<sub>2</sub>/Kg combustível e de monóxido de carbono equivale a 152g CO/Kg de combustível. No entanto, com o uso do propelente ALICE não ocorre formação de gases tóxicos, produzindo óxido de alumínio, aproximadamente 945g Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Kg combustível. A utilização de propelentes ambientalmente amigáveis constitui uma alternativa sustentável para promover ainda mais os avanços na área espacial.

Palavras-chave: Foguetes. Propelente. Poluição atmosférica. Tecnologias Limpas.

Área Temática: Tecnologias Limpas.

## **Solid propellants for rockets – Evaluation of toxic gases generation based on the combustion reactions**

### *Abstract*

*Currently, solid propellants used as fuels for rockets generate large amounts of toxic gases during its burning. The burning of these fuels leads to the increase of gases responsible for greenhouse effect. The increasing in the activities in the space field has stimulated the development of environmentally friendly propellant. This study aims to compare the theoretical amount of gas generated during the combustion of a propellant commonly used in short-range rockets with the amount of gas generated from an environmentally friendly propellant. So, the theoretical amount of gas generated with the combustion of sucrose/potassium nitrate propellant (KNSu) was compared with the amount of gases produced with the combustion of a mix of aluminum nanoparticles and ice (ALICE). The results showed that KNSu burning generates approximately 175g CO<sub>2</sub>/Kg fuel and 152g CO/Kg fuel. However, using ALICE no toxic gases were produced only aluminum oxide, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, was formed approximately 945g Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Kg fuel. The use of environmentally friendly propellants is a sustainable alternative for promote further advances in the space field.*

*Key words:* *Rockets. Propellant. Atmospheric pollution. Clean technologies.*

*Theme Area:* *Clean technologies.*



## 1 Introdução

A propulsão de motores foguete utilizando combustíveis ambientalmente amigáveis pode ser entendida como um desafio à contemporaneidade das atividades espaciais (GOHARDANI et al., 2014). Atualmente a maioria dos foguetes emprega propulsores obtidos a partir de compostos tóxicos, tais como hidrazina, perclorato de amônia, nitrato de amônia, entre outros (KAKAVAS, 2014; GOHARDANI et al., 2014). Estes compostos são utilizados, pois geram grande quantidade de energia no momento de sua combustão. No entanto, também liberam grandes quantidades de compostos nocivos ao meio ambiente e que também contribuem com o efeito estufa.

O propelente sólido é uma mistura complexa e estável de compostos oxidantes e redutores. Quando esses compostos são ignitados queimam de uma maneira contínua e homogênea, gerando calor e formando moléculas gasosas de baixa massa molecular (SCIAMARELI et al., 2002). Assim, no interior da câmara do motor ocorre a formação de várias espécies gasosas e consequentemente um grande aumento da temperatura e da pressão no sistema (SCIAMARELI et al., 2002) devido às reações de combustão. Na saída do motor existe um estreitamento, chamado de tubeira, por onde os gases resultantes da queima saem acelerados (SCIAMARELI et al., 2002) o que proporciona impulsão ao foguete. Em contrapartida, a são expelidos gases tóxicos como CO, CO<sub>2</sub>, NOx, entre outros.

O propelente constituído por sacarose e nitrato de potássio, conhecido como KNSu, é um propelente tradicionalmente utilizado em minifoguetes. Os componentes para produção do combustível são de fácil obtenção e este propelente produz um impulso específico relativamente elevado (FOLTRAN et al., 2015). Contudo, sua queima libera grandes quantidades de dióxido de carbono e monóxido de carbono. Atualmente, diversas alternativas vêm sendo desenvolvidas para produção de propelentes que não liberem gases tóxicos. Uma delas foi o desenvolvimento de propelentes baseados em uma mistura de alumínio e água, que depois de congelada forma um propelente sólido (RISHA et al., 2014). O avanço da nanotecnologia proporcionou à utilização de nanopartículas de alumínio misturadas a água para aumentar o desempenho do propelente, no entanto, a combustão desse tipo de mistura vem sendo estudada desde 1960 (RISHA et al., 2009). A reação do alumínio com a água libera grandes quantidades de energia durante a combustão, além de que, os produtos da reação não são tóxicos.

Diversos estudos podem ser encontrados na literatura avaliando as reações de combustão e o calor gerado pela queima de diferentes tipos de propelentes (RISHA et al., 2014; FOLTRAN et al., 2015; MARCHI e ARAKI, 2015). No entanto, poucos estudos tem como foco a quantificação teórica ou experimental da quantidade de gases tóxicos produzidos com a queima destes propelentes. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo comparar a quantidade teórica de geração de gases tóxicos com base na estequiometria das reações de queima de dois propelentes utilizando o software *ProPep 3*. Foram determinadas as quantidades teóricas de geração de gases tóxicos do KNSu e também dos produtos da reação de queima do propelente ALICE.

## 2 Projeto Gincarvi Júnior

O projeto Gincarvi Júnior vem sendo desenvolvido na Universidade de Caxias do Sul, mais especificamente no Campus Universitário da Região dos Vinhedos desde 2014. O projeto tem como objetivo principal o desenvolvimento de um minifoguete totalmente projetado e construído por alunos pertencentes a diversos cursos de engenharia da UCS. Atualmente o projeto conta com a participação de 11 alunos e 4 professores. O minifoguete utiliza como propelente KNSu composto por 65% em massa de nitrato de potássio e 35% em



massa de açúcar. Contudo, estudos iniciais para utilização do propelente ALICE já estão em andamento.

### 3 Metodologia

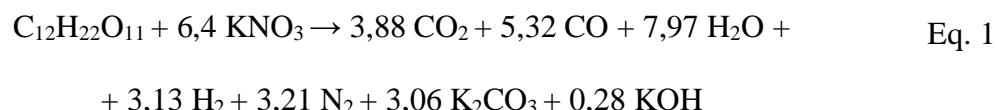
Para determinação da quantidade de cada produto gerado pela queima dos dois propelentes utilizou-se o software *ProPep 3 versão 1.0.1* desenvolvido para simulação dos produtos da reação de queima de diversos tipos de propelentes. As condições de contorno utilizadas para determinação dos produtos da reação foram:

Massa total de propelente: 1 Kg;  
Temperatura dos reagentes: 298 K (25°C);  
Pressão na câmara do motor: 1000 psi (68 atm).

Como massa total de propelente foi adotada a quantidade de 1 Kg de mistura. Para o KNSu utilizou-se como quantidade de entrada dos reagentes no software a mistura padrão de 65% em massa de nitrato de potássio e 35% em massa de açúcar (FOLTRAN et al., 2015) e para o propelente ALICE a quantidade de entrada dos reagentes foi de 50% em massa de alumínio e 50% de água (RISHA et al., 2009). Estes valores foram escolhidos por serem os mais amplamente utilizados na literatura (FOLTRAN et al., 2015; RISHA et al., 2009).

### 4 Resultados e Discussão

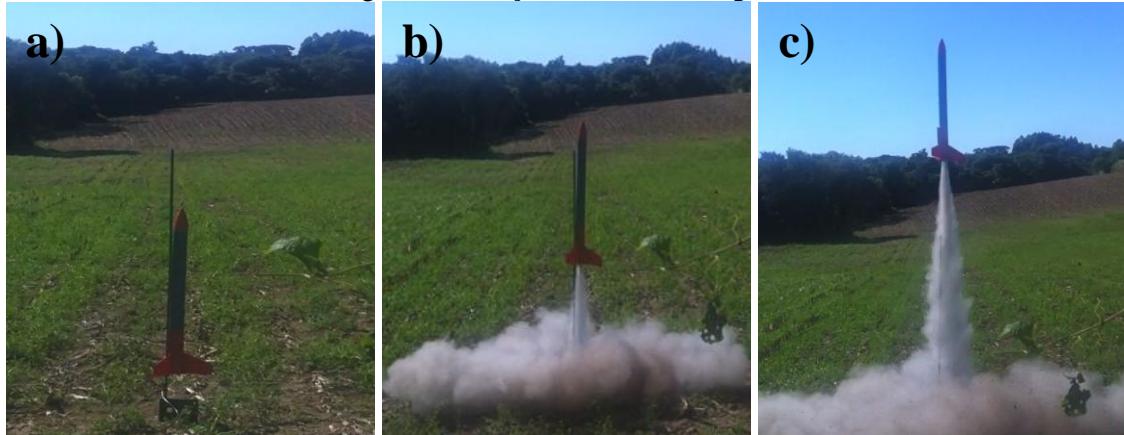
A reação de queima do propelente KNSu envolve a oxidação da molécula de sacarose presente no açúcar pelo nitrato de potássio. A reação, além da liberação de energia, gera diversos produtos. A reação proposta obtida com auxílio do software *ProPep 3*, pode ser observada na Equação 1:



Sob as condições de temperatura e principalmente pressão em que esta reação ocorre, a maioria dos produtos gerados está na forma de gás. Estes gases contribuem para aumentar a pressão na câmara do motor e à medida que são expelidos auxiliam ainda mais na impulsão do foguete. A Figura 1 mostra um lançamento realizado pela equipe Gincarvi Júnior da UCS. Pode-se verificar o foguete na base de lançamentos instantes antes de ser lançado, Figura 1(a), e depois de transcorridos 1-2 segundos do lançamento, Figura 1(b) e Figura 1(c), respectivamente. Observa-se a grande quantidade de gases liberados com a queima do propelente KNSu. As maiores quantidades de gases liberados, segundo a reação apresentada na Equação 1, são vapor de água, monóxido de carbono e dióxido de carbono, respectivamente. Dentre todos os produtos obtidos com a reação apenas o monóxido de carbono e o dióxido de carbono são compostos tóxicos e ambos os gases contribuem com o efeito estufa. O gás nitrogênio é inerte, enquanto que o gás hidrogênio formado pode se combinar com o oxigênio do ar produzindo água. O carbonato de potássio e o hidróxido de potássio apresentam certa reatividade, mas não são considerados tóxicos. Ressalta-se ainda que traços de outros gases tóxicos podem ser formados, tais como, metano,  $\text{NO}_x$ , entre outros, no entanto sua quantificação requer equipamentos mais avançados e medições *in situ*.



Figura 1 – Lançamento do minifoguete



A reação de queima do propelente ALICE gera como produtos o óxido de alumínio e o gás hidrogênio, conforme mostrado na Equação 2:



Os dois compostos obtidos não são tóxicos (POURPOINT et al., 2012). Além do mais, o hidrogênio pode se combinar com o oxigênio do ar, gerando como produto a água e liberando mais uma quantidade de energia para impulsionar o foguete (INGENITO e BRUNO, 2004), conforme apresentado na Equação 3:



Fica evidente que, diferentemente do KNSu, o propelente ALICE gera como produtos água e óxido de alumínio. Desta forma, os produtos gerados com a queima deste propelente não agridem o meio ambiente e por isso o desenvolvimento de pesquisas buscando o aumento do desempenho do propelente ALICE vem crescendo muito nos últimos anos. A Tabela 1 apresenta um comparativo com as quantidades em massa de cada um dos produtos gerados com a queima de 1 Kg dos propelentes estudados.

Tabela 1 – Quantidade em massa de compostos gerados com a queima de 1 Kg de propelente\*.

Composto	Estado físico	KNSu (g)	ALICE (g)
CO <sub>2</sub>	Gás	174,7	---
CO	Gás	152,4	---
H <sub>2</sub> O	Gás	146,8	---
H <sub>2</sub>	Gás	3,20	---
N <sub>2</sub>	Gás	92,0	---
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Sólido	432,2	---
KOH	Gás	16,0	---
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sólido	---	944,5
H <sub>2</sub>	Gás	---	55,5

\* Considerando KNSu com 35% de sacarose e 65% de nitrato de potássio e ALICE com 50% Al e 50% água.

Os padrões nacionais de qualidade do ar fixados pela Resolução CONAMA 03/90 (BRASIL, 1990) estipulam a quantidade máxima de partículas totais em suspensão, dióxido de enxofre, ozônio, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de nitrogênio e monóxido de



carbono que podem estar presentes no ar atmosférico. Segundo a resolução, são permitidos no máximo 35 ppm de CO no ar atmosférico por um tempo de amostragem de 1h. Admitindo que o CO e também o CO<sub>2</sub> se comportem como gases ideais a queima de 1 Kg de KNSu produz 215 ppm de monóxido de carbono, enquanto que também são produzidos 464 ppm de dióxido de carbono, ambos os valores baseados na quantidade molar apresentada na reação química proposta na Equação 1. Essa concentração de monóxido de carbono é muito superior à concentração permitida. Contudo, esse valor não leva em conta os efeitos de dispersão causados pelo ar no momento em que o CO é expelido da câmara do motor, mas indica a necessidade de estudos futuros. No entanto, verifica-se que uma quantidade elevada de gases poluentes é produzida com a queima do KNSu e que deve-se buscar uma alternativa mais viável sob o ponto de vista ambiental, como é o caso do propelente ALICE.

## 5 Conclusão

A quantidade teórica de geração de gases com a utilização de KNSu e do propelente ALICE foi determinada. Os resultados demonstraram que grandes quantidade de CO<sub>2</sub> e CO são expelidos da câmara do motor com a utilização de KNSu. Por outro lado, a queima do propelente ALICE resulta em compostos que não são tóxicos e que não agridem o meio ambiente. Desta forma, a busca por propelentes mais ambientalmente amigáveis que possam substituir gradualmente aqueles que geram compostos tóxicos e nocivos tanto ao meio ambiente quanto a saúde humana é uma alternativa mais viável sob o ponto de vista ambiental em detrimento ao uso dos propelentes atuais.

## Referências

- BRASIL, **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 3.** *Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR*, junho 1990.
- FOLTRAN, A.C., MORO, D.F., da SILVA, N.D.P., FERREIRA, A.E.G., ARAKI, L.K., MARCHI, C.H. *Burning rate measurement of KNSu propellant obtained by mechanical press*. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 7, 2015, pg. 193-199.
- GOHARDANI, A.S., STANOJEV, J., DEMAIRÉ, A., ANFLO, K., PERSSON, M., WINGBORG, N., NILSSON, C. *Green space propulsion: opportunities and prospects*. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 71, 2014, pg. 128-149.
- INGENITO, A., BRUNO, C. *Using aluminum for space propulsion*. **Journal of Propulsion and Power**, v. 20, 2004, pg. 1056-1063.
- KAKAVAS, P.A. *Mechanical properties of propellant composite materials reinforced with ammonium perchlorate particles*. **International Journal of Solids and Structures**, v. 51, 2014, pg. 2019-2026.
- MARCHI, C.H., ARAKI, L.K. *Evaluation of chemical equilibrium and non-equilibrium properties for LOX/LH<sub>2</sub> reaction schemes*. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 7, 2015, pg. 31-42.



## 5º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 5 a 7 de Abril de 2016

POURPOINT, T.L., WOOD, T.D., PFEIL, M.A., TSOHAS, J., SON, S.F. *Feasibility study and demonstration of an aluminum and ice solid propellant.* **International Journal of Aerospace Engineering**, v. 2012, 2012, pg.1-11.

RISHA, G.A., CONNELL Jr., T.L., YETTER, R.A. YANG, V., WOOD, T.D., PFEIL, M.A., POURPOINT, T.L., SON, S.F. Aluminum-ice (ALICE) propellants for hydrogen generation and propulsion. **IN:** 45 th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2-5 August 2009, Denver - USA.

RISHA, G.A., CONNELL Jr., T.L., YETTER, R.A. SUDARAM, D.S., YANG, V. *Combustion of frozen nanoaluminum and water mixtures.* **Journal of Propulsion and Power**, v. 30, 2014, pg. 133-142.

SCIAMARELI, J., TAKAHASHI, M.F.K., TEXEIRA, J.M. *Propelente sólido compósito polibutadiênico: I- influência do agente de ligação.* **Química Nova**, v. 25, 2002, pg. 107-110.