

Propelente KNSu a frio para minifoguetes: preparo, carregamento, estocagem e uso

Prof. Carlos Henrique Marchi

(fogueteiro desde 1981)

Departamento de Engenharia Mecânica

Universidade Federal do Paraná (UFPR) – Curitiba

Grupo de Foguetes Carl Sagan (GFCS) – 2005

Laboratório de Atividades Espaciais (LAE) – 2011

minifoguete@gmail.com

22 Out 2021

Comentários iniciais

Esta palestra foi preparada para a

12ª Semana da Engenharia do Centro Universitário da Fundação Hermínio Ometto, de Araras (SP).

Esta palestra está dividida em **duas partes**:

- (1) na **primeira**, será feita a minha apresentação que durará aproximadamente uma hora; e
- (2) na **segunda** parte teremos até meia hora para perguntas com a mediação do prof. Dawson Izola da Comissão Organizadora do evento.

Desde já, por favor, **registrem suas perguntas no chat** desta palestra.

Objetivo desta palestra

Apresentar a minha experiência de 10 anos em atividades com o **propelente KNSu a frio**:

- 2 anos em Florianópolis no grupo de foguetes LAE na UFSC (1988-1990)
- 8 anos em Curitiba no GFCS da UFPR (2013-2021)

O KNSu a frio é mais seguro que o a quente e tem outras vantagens mas tem uma desvantagem.
Logo comentarei as diferenças entre os dois métodos.

Roteiro desta palestra:

- O que é KNSu?
- Criação do KNSu
- Preparo do KNSu
- Carregamento do KNSu
- Estocagem do KNSu
- Uso do KNSu
- Comentários finais
- Perguntas

O que é KNSu?

A sigla **KNSu** é a abreviação inglesa de Potassium(**K**)-**N**itrate (KNO_3) e **Su**crose ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) que são usados na composição deste propelente.

Propelente é a mistura de um oxidante com um combustível que permite a um motor-foguete funcionar em qualquer ambiente: no ar, dentro da água e no vácuo do espaço.

No caso do KNSu, o nitrato de potássio é o oxidante e a sacarose é o combustível.

Como ambos estão no estado sólido, na temperatura ambiente, o KNSu é um propelente sólido.

Composições mais comuns de KNSu:

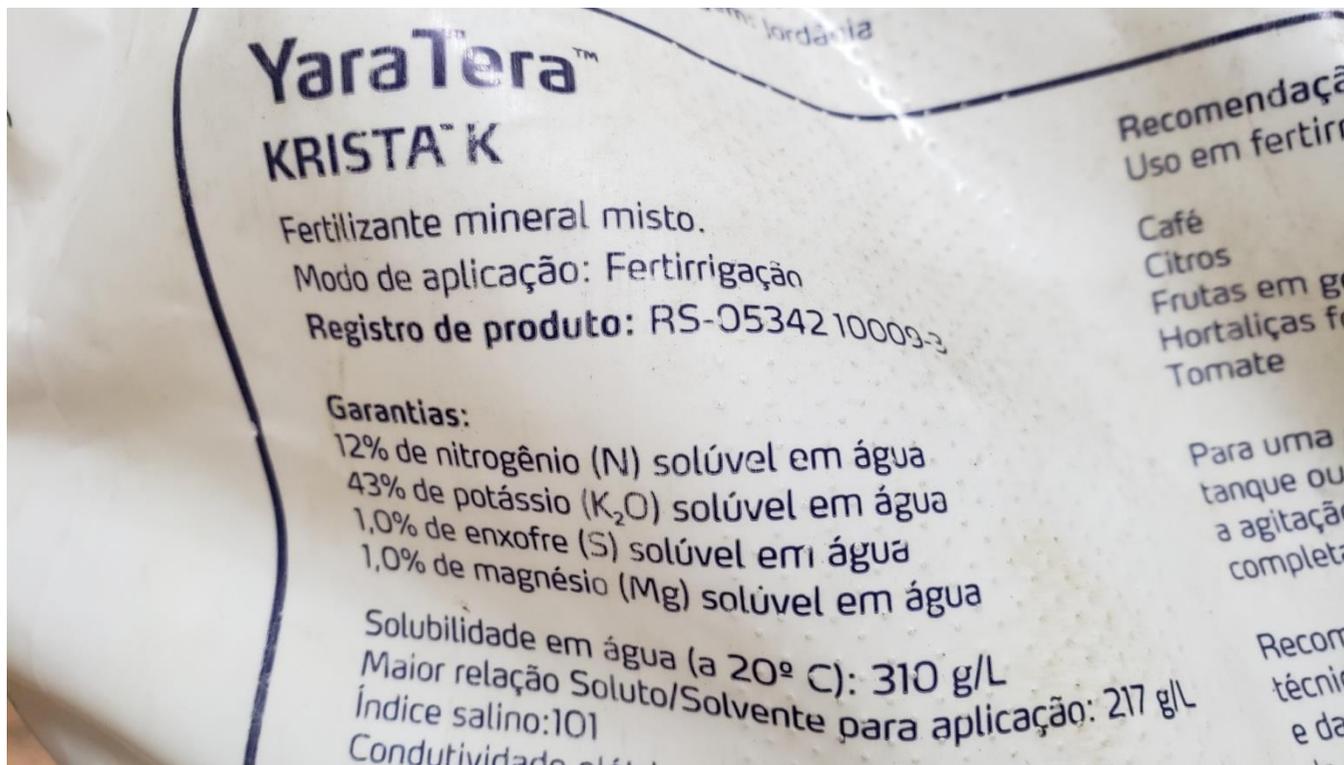
- 65% de nitrato de potássio com 35% de sacarose ([Nakka, 2017](#))
- 60% de nitrato de potássio com 40% de sacarose ([Vyverman, 1978](#))

Métodos para preparar e carregar KNSu em motor-foguete:

- **a quente:** o KNSu é aquecido, tornando-se uma massa pastosa que é colocada em fôrmas para esfriar, formando o grão-propelente. **Pessoas já se queimaram!**
Atualmente é o método mais comum de preparar o KNSu, que não é abordado aqui. Interessados neste método devem acessar o seguinte link: [Nakka, 2017](#).
- **a frio:** o KNSu é preparado misturando-se o nitrato de potássio e a sacarose na temperatura ambiente.
O grão-propelente é formado ao se compactar o KNSu no motor-foguete.
Este é o método apresentado nesta palestra.

Componentes usados (ver fotos abaixo):

- **Fertilizante Krista K** da marca Yara Tera do tipo 12 43 1S 1Mg que contém no mínimo 90% de nitrato de potássio (KNO_3) e de 5% a 7% de MgSO_4 .
Pode ser adquirido em lojas de produtos agrícolas e no Mercado Livre.
- **Açúcar** tipo sacarose refinado amorfo da marca União classe cristal branco que contém no mínimo 99% de sacarose ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$).
Pode ser adquirido em supermercados.



Fertilizante Krista K usado como oxidante



Açúcar usado como combustível

Componentes do KNSu do GFCS/UFPR

Observação:

usamos o fertilizante Krista K na forma que ele é vendido comercialmente, apenas moendo; ou seja, **não purificamos o Krista K.**

Criação do KNSu

Conforme [Nakka \(2001\)](#),
o KNSu foi **inventado em 1943 por Bill Colburn**
na forma de **pó compactado com auxílio de água**.

O **primeiro minifoguete usando KNSu foi lançado em 1947**.

Já em 1960, o KNSu foi citado (Brinley) como um dos dois propelentes amadores mais usados. O outro era o micrograin (enxofre com alumínio em pó), que é pouco utilizado atualmente e muito perigoso.

Preparo do KNSu

Definição das massas

- Definir a massa total M_t a ser preparada de KNSu; por exemplo, $M_t = 400$ g.
- A massa de oxidante M_o será $M_o = 0,65 \times M_t$; por exemplo, $M_o = 0,65 \times 400 = 260$ g.
- A massa de combustível M_c será $M_c = 0,35 \times M_t$; por exemplo, $M_c = 0,35 \times 400 = 140$ g.



Moagem

- Moer porções de 100 gramas de oxidante por 30 segundos; por exemplo, 3.
- Moer porções de 100 gramas de combustível por 30 segundos; por exemplo, 2.
- Recomendação: usar um moedor só para oxidante e outro só para combustível.
- Tipo de moedor usado: Cadence, moedor de café MDR-301 (ver fotos acima).

Mistura

- Colocar dentro de um recipiente o oxidante (Mo); por exemplo, 260 g.
- Colocar dentro do mesmo recipiente o combustível (Mc); por exemplo, 140 g.
- Misturar por 15 minutos o oxidante com o combustível. Usamos mistura manual (ver foto abaixo).
- O recipiente pode ser um saco ziploc ou um tubo de PVC (ver foto abaixo).



Carregamento do KNSu

Materiais necessários:

- prensa hidráulica
- tubo-motor a ser carregado
- KNSu
- ferramentas de prensagem: tampa, mandril (alma) e punção (1 a 4).

Procedimento de prensagem:

- divide-se a massa de propelente M_p a prensar no tubo em 3 a 6 partes
- despeja-se a primeira parte dentro do tubo-motor e se faz a sua prensagem
- repete-se o item anterior para as demais partes de M_p

Observações:

- a folga nominal entre duas peças é de 0,5 mm
- a prensa hidráulica usada permite força máxima de 15 toneladas
- a força usada na prensagem é de 3 a 10 toneladas dependendo do diâmetro do tubo-motor
- o mandril é um tronco de cone para facilitar a sua extração após a prensagem (0,3 a 0,6°)
- a força de extração do mandril normalmente é baixa mas pode chegar a 6 toneladas
- as ferramentas de prensagem são de aço 1020



**Tube-motor Saturno-Gama e suas ferramentas de prensagem:
tampa, mandril (alma) e punção mais longo (oco para a alma entrar nele)**



tampa com mandril (alma)



Saturno-Gama com tampa e mandril (alma)



prensagem do KNSu no Saturno-Gama



**Tubo-motor Saturno-Gama após a prensagem do KNSu;
o excesso de KNSu ainda precisa ser retirado das roscas.**

Estocagem do KNSu

Procedimento:

- Antes de armazenar um motor carregado, remove-se os resíduos de KNSu que ficam na superfície externa do tubo-motor; pode-se usar um pano com álcool em gel.
- Também remove-se o excesso de KNSu que fica nas roscas da tampa e tubeira por dentro do tubo-motor; pode-se usar qualquer objeto pontiagudo para raspar nos fios das roscas e soltar o KNSu; depois pode-se usar uma escova de dentes para remover para fora do tubo o KNSu solto.
- Em seguida, o tubo-motor é colocado na posição horizontal dentro de uma caixa plástica hermética com antimoho (cloreto de cálcio) (ver foto abaixo).

Observações:

- Pode-se guardar vários motores dentro de uma mesma caixa (ver foto abaixo).
- Geralmente os motores ficam armazenados entre 15 e 60 dias antes do uso. Mas já tivemos casos em que os motores ficaram armazenados por mais de um ano, até 19 meses, e foram usados sem qualquer problema na ignição e sem afetar o desempenho do motor.
- Se o motor ficar no ambiente, sem controle de umidade, o procedimento padrão de ignição também funciona mas o desempenho do motor vai reduzido levemente com o tempo; a redução média foi de 6% conforme estudo com motor que usa 175 g de KNSu e testes com 15, 45 e 120 dias.

- É feito um acompanhamento da massa do motor ao longo do tempo de estocagem.



Estocagem de motores carregados com KNSu

Uso do KNSu

Dados gerais dos motores-foguete já desenvolvidos pelo GFCS com KNSu a frio:

- desde 2013, motores-foguete de todas as classes de 1/8A até K (ver fotos abaixo)



Motores-foguete desenvolvidos pelo GFCS/UFPR das classes F, G, H, I e J.

- a ignição é feita à distância usando sistema elétrico com bateria, chave de segurança, chave de ignição, squib (fio laranja na foto abaixo à direita), fita durex com pólvora negra granulada (ver foto abaixo à esquerda) dentro da alma do grão que é acionada pela squib; este método resulta em pressurização rápida do motor
- a quantidade de pólvora usada depende do comprimento do motor variando de 0,85 g para grão de 100 mm a 2,00 g para grão de 500 mm
- a massa de propelente pode ser ajustada através da remoção do excesso de KNSu



Motor-foguete Netuno-R-Beta: tubo-motor, tampa, tubeira, ignitor e 2 o-ring



Motor-foguete Urano-Beta preparado para teste com ignitor e squib (laranja) conectados

Método desenvolvido pelo GFCS/UFPR para ignitar grão tubular de KNSu.

- pressão de combustão média e máxima estimadas = 5 a 20 bar
- impulso específico médio experimental (real) = 63 a 82 s
- nunca tivemos qualquer acidente na preparação, carregamento e estocagem do KNSu a frio
- já tivemos vários acidentes, sem vítimas, durante a queima de KNSu em motores-foguete nas fases de testes em solo (ver vídeo [Que Susto](#))
- as peças de cada motor (tubo-motor, tampa e tubeira) são conectadas através de roscas com o-ring
- não usamos isolamento térmico em nossos motores, mesmo para tempos de queima em alumínio (Júpiter) de até 13,7 s e em aço (MTP-Alfa) de até 26,2 s.
- Materiais já usados no tubo-motor (tubos sem costura): acrílico, PVC, ligas de alumínio (6063-T5, 6351) para testes em solo e em voo, e aço (4340) para testes em solo
- Materiais já usados na tampa (classes F a K): ligas de alumínio (2024-T3, 6351) e aço (1020 e 4340); para voo, usa-se alumínio
- Materiais já usados na tubeira: para classes F a H, ligas de alumínio (2024-T3, 6351); classes H e acima, aço 1020, 4340 e inox 304

- diâmetro externo do grão-propelente desde 13 a 96 mm
- comprimento do grão-propelente desde 5 a 512 mm
- massa do grão-propelente desde 0,7 a 2413 g

- massa específica do KNSu prensado (em média): 1314 a 1556 kg/m³, ou seja, 70 a 82% da massa específica teórica do KNSu puro que é de 1888 kg/m³

- Foram desenvolvidos motores de acrílico com KNSu das classes 1/8A a C. Realizados aproximadamente 301 testes em solo e voo.
- Foram desenvolvidos motores de PVC com KNSu das classes C, D e E. Realizados aproximadamente 256 testes em solo e voo.
- Foram desenvolvidos 2 motores de aço para teste do propelente KNSu e tubeiras com impulso total até classe G. Realizados 66 testes em solo.
- Foram desenvolvidos motores de alumínio das classes F a K. Realizados 277 testes em solo e 53 testes em voo (lançamentos), totalizando 330 testes.

- Já preparamos aproximadamente 130 kg de KNSu a frio.

Comentários finais

- Provavelmente o método a frio é o mais seguro para o preparo e carregamento do KNSu. A ignição do KNSu e o desempenho do motor não se alteram se o motor é estocado adequadamente.
- Uma vantagem do KNSu a quente é a massa específica maior.
- O [motor-foguete da MOBFOG/OBA](#) usa KNSu a frio.
- Estudo em andamento para carregar manualmente o KNSu com líquido em motores de vários tamanhos, para não ter que usar prensa hidráulica.
- Nos próximos meses divulgarei novos vídeos no meu canal no YouTube sobre preparo, carregamento, estocagem e uso do KNSu.
- Também serão divulgados dados completos do motor-foguete Netuno-R-Beta da classe G, incluindo desenhos técnicos e resultados de testes. Este motor permite lançar minifoguetes com apogeu variando de 250 a 800 metros.

Links recomendados:

- Relatório de preparo e carregamento de KNSu ([formulário](#) e [exemplo](#))
- Relatório de carregamento de motor ([formulário](#) e [exemplo](#))
- Relatório de estocagem de motor Mxt ([formulário](#) e [exemplo](#))

- Relatório de uso de motor ([formulário](#) e [exemplo](#))
- [Vídeo mostrando 19 motores estocados em 4 Jul 2021](#)
- [Vídeo de testes com tabletes de KNSu; também disponíveis 2 artigos científicos](#)
- [Vídeo de testes em tubos de acrílico com grão-propelente cilíndrico de KNSu](#)
- [Vídeo de testes em tubos de acrílico com grão-propelente tubular de KNSu](#)
- [Vídeo de teste estático de motor classe C em tubo de acrílico](#)
- [Vídeo do teste estático 17 do motor-foguete Saturno da classe I](#)
- [Vídeo do lançamento do minifoguete Netuno-R-B/Paraná-19 em 12 Fev 2019 com um motor-foguete da classe G](#)
- [Texto do minicurso de 2020 de preparo e carregamento de KNSu](#)
- [Relatório de IC do Jeovan Correia \(2016\)](#) sobre diversos parâmetros do KNSu
- [TCC do Lucas Schlossmacher \(2015\)](#) sobre motores-foguete de tubo de acrílico

Perguntas

com mediação do prof. Dawson Izola (UNIARARAS)

Registre suas perguntas no chat

APÊNDICE

Informações sobre o Grupo de Foguetes Carl Sagan (GFCS):

Apoiadores: <http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Apoiadores-GFCS/>

Notícias: <http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Divulgacao/>

Membros: <http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Membros/>

Prêmios e conquistas: http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Premios_GFCS/

Recordes de motores: <http://foguetefpr.blogspot.com/2020/07/recordes-de-motores-foguete-do-gfcs-lae.html>

Recordes de minifoguetes: <http://foguetefpr.blogspot.com/2020/03/recordes-de-apogeu-de-minifoguetes.html>

Blog do GFCS: <http://foguetefpr.blogspot.com/>

Facebook do GFCS: <https://www.facebook.com/gfcsufpr>

Site do GFCS: <http://www.foguete.ufpr.br/>

YouTube: <https://www.youtube.com/c/CarlosHenriqueMarchi>

Carlos Henrique Marchi

Doutor em engenharia mecânica em 2001 pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Professor (1994) titular (2017) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Fundador em 2005 e líder do Grupo de Foguetes Carl Sagan (GFCS) da UFPR

Criador em 2011 e coordenador do Laboratório de Atividades Espaciais (LAE) da UFPR

Criador em 2013 do **Festival de Minifoguetes de Curitiba** cujo primeiro evento ocorreu em 2014 e mais cinco até 2019

Fundador em 2016 da **Associação Brasileira de Minifoguetes (BAR)** junto com 12 grupos de foguetes; seu presidente até 2020

Criador em 2018 do **Museu de Minifoguetes** da UFPR/BAR

Criador em 2020 da **Maratona Aberta de Minifoguetes** cujo primeiro evento ocorrerá em 2021

Sou **fogueteiro desde 1981** e continuo a ficar maravilhado sempre que faço algum teste estático de motor-foguete e, principalmente, quando lanço um minifoguete

Classificação dos motores segundo a NAR

NAR = National Association of Rocketry – Estados Unidos

| Tipo de minifoguete | Categoria | Classe do motor | Impulso total (It) [N.s] | | |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|----------|----------|
| FM foguetemodelo | Micro | $\frac{1}{8}$ A | 0,00 | a | 0,3125 |
| | | $\frac{1}{4}$ A | 0,3126 | a | 0,625 |
| | | $\frac{1}{2}$ A | 0,626 | a | 1,25 |
| | Baixa potência | A | 1,26 | a | 2,50 |
| | | B | 2,51 | a | 5,00 |
| | | C | 5,01 | a | 10,00 |
| | | D | 10,01 | a | 20,00 |
| | | Média potência | E | 20,01 | a |
| | F | | 40,01 | a | 80,00 |
| | G | | 80,01 | a | 160,00 |
| MFE minifoguete experimental | Nível 1 | H | 160,01 | a | 320,00 |
| | | I | 320,01 | a | 640,00 |
| | Nível 2 | J | 640,01 | a | 1280,00 |
| | | K | 1280,01 | a | 2560,00 |
| | | L | 2560,01 | a | 5120,00 |
| | Nível 3 | M | 5120,01 | a | 10240,00 |
| | | N | 10240,01 | a | 20480,00 |
| O | | 20480,01 | a | 40960,00 | |