



TERRA Project Update (2019). A Brazilian Nuclear Space Microreactor Development

Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães

Divisão de Energia Nuclear (ENU)

Instituto de Estudos Avançados (IEAv)

Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA)

Comando da Aeronáutica, MD

lamar.guima@gmail.com, guimarae@ieav.cta.br, www.ieav.cta.br

International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2019

XXIth Meeting on Nuclear Reactor Physics and Thermal Hydraulics – XXI ENFIR

Santos, SP

October 23rd, 2019



Summary

- Nuclear Space Propulsion
- Aerospace versus Space
- Institute for Advanced Studies - IEAv
- ENU/IEAv nuclear projects
- TERRA Project and NEP
- TERRA Project developments

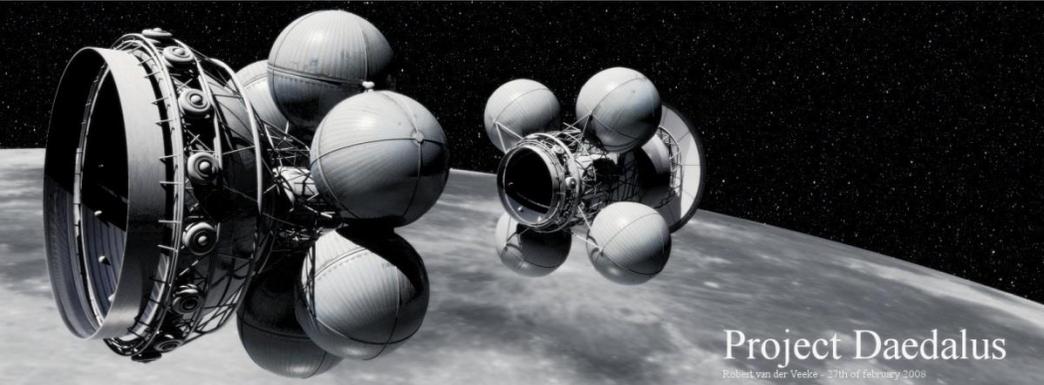


Nuclear Space Propulsion



Nuclear Space Propulsion

73-78 BIS



Project Daedalus
Robert van der Veeke - 7th of February 2008



Updated concept based on Dr. White's theoretical findings, rendered by Mark Rademaker with artwork and inputs from Mike Okuda

Very bad idea – project ORION 59-60



Stan Ulam and Cornelius Everett (1946)

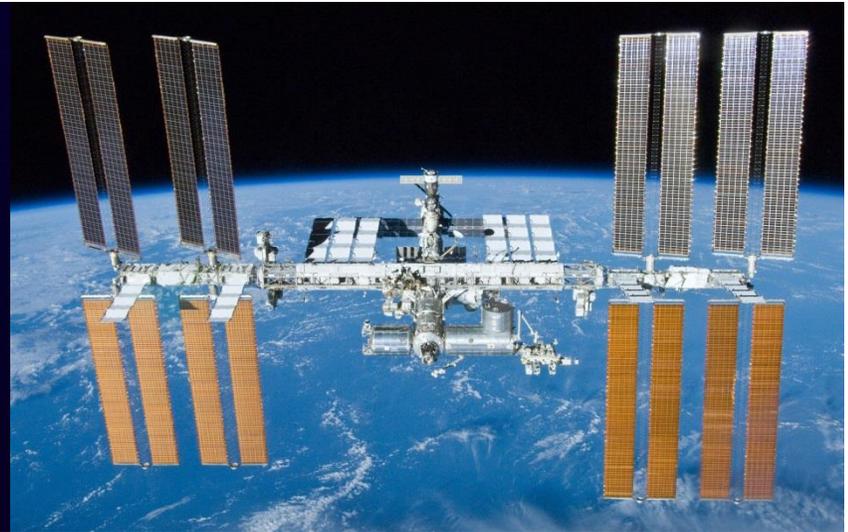


Icarus, son of Daedalus -2009



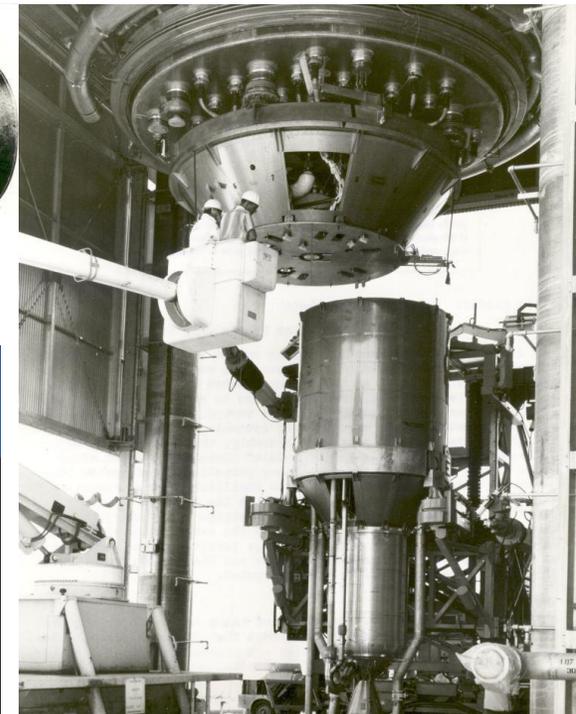
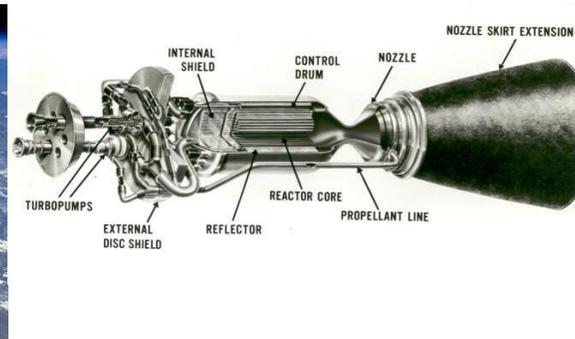


Nuclear Space Propulsion



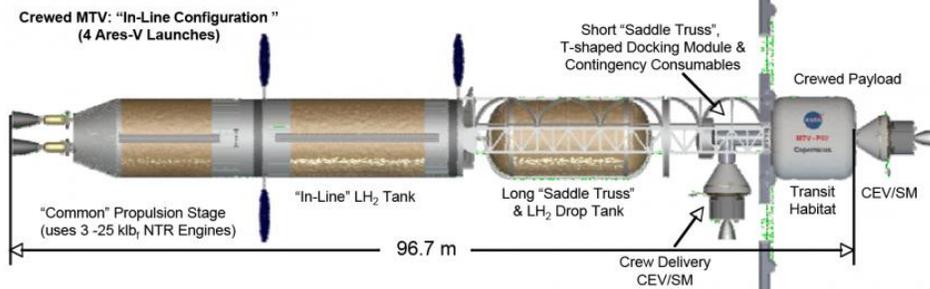
Nuclear Space Propulsion

Orion – XXIst century

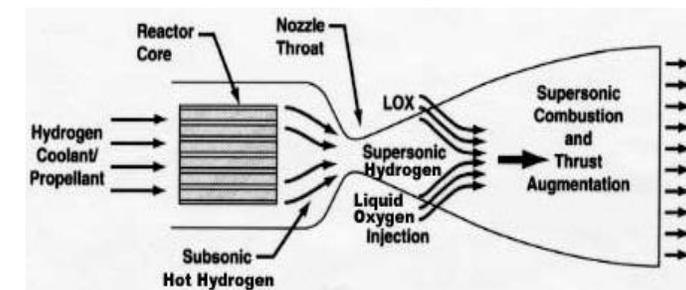


Project ROVER
ICBM, USAF 1955-1973.
Transferido para NASA em 1958.

NASA – Project NERVA – Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application - 60's

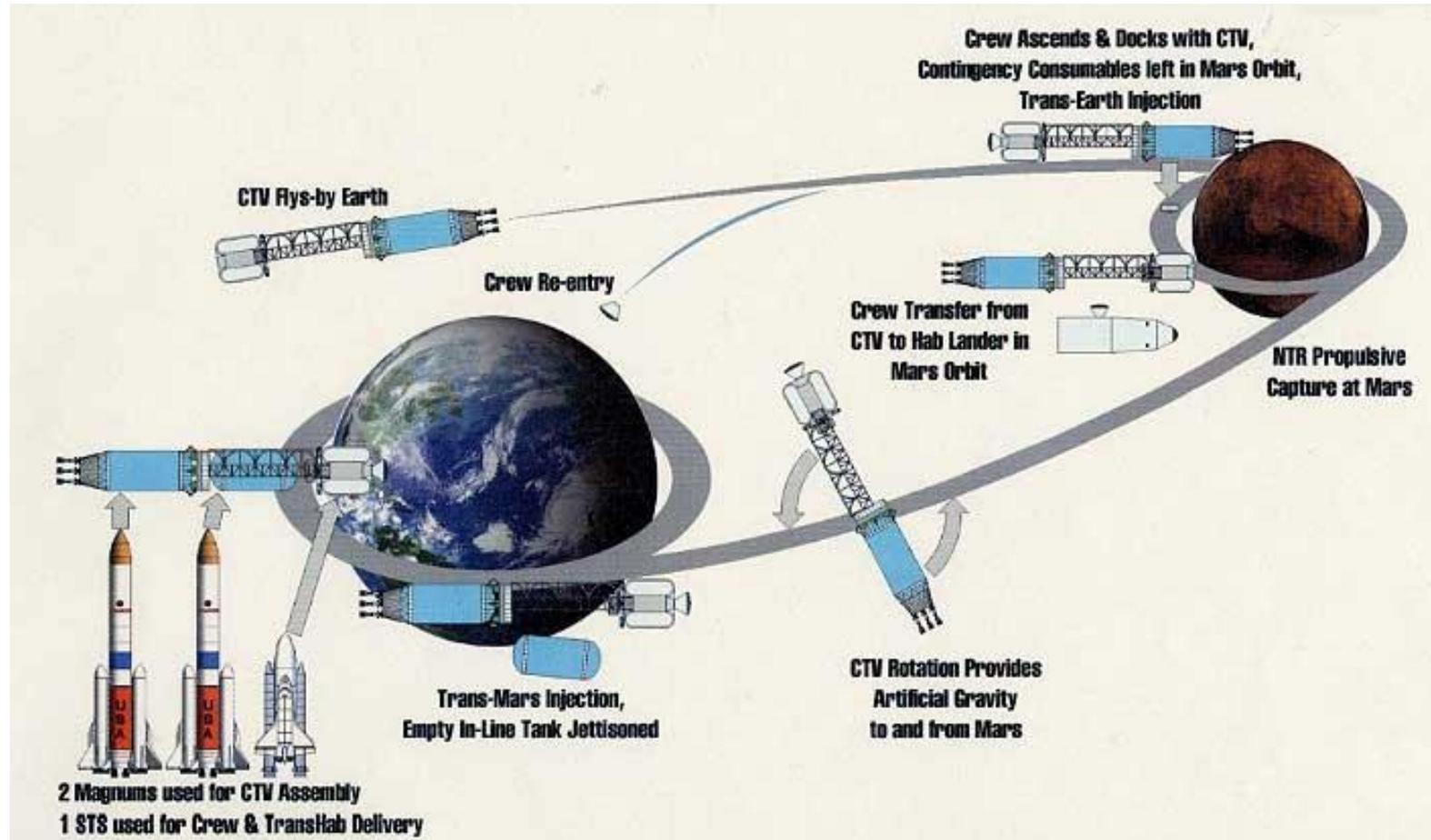


Nuclear Thermal Propulsion – NTP.



Nuclear Space Propulsion

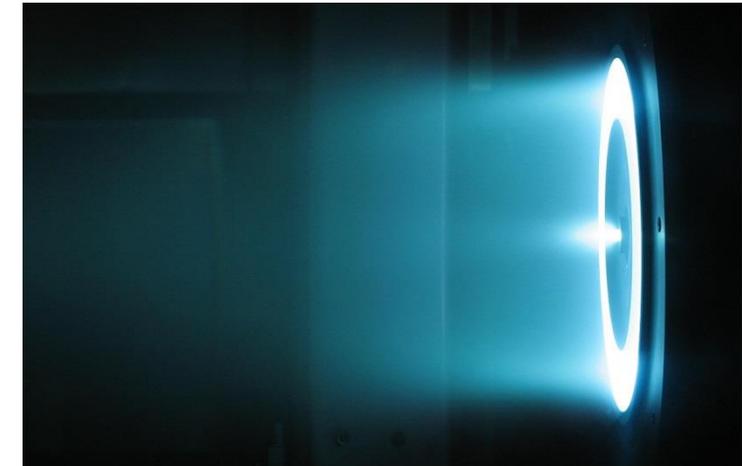
NTP bimodal use for mission schematics.



Nuclear Space Propulsion

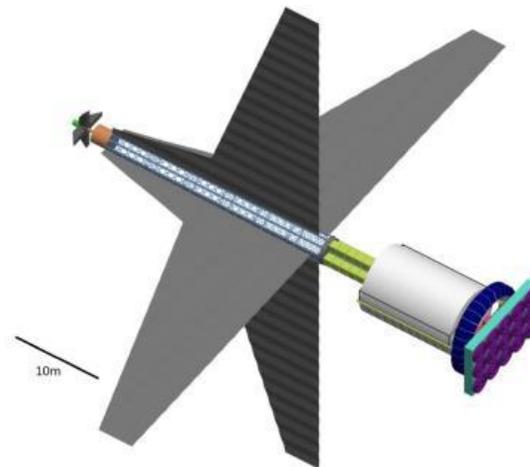
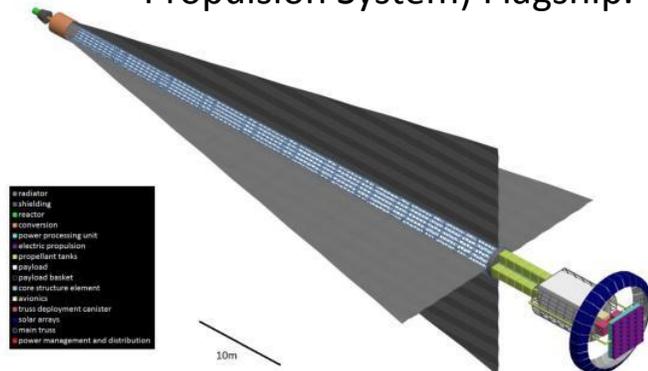
JIMO – Jupiter Iced Moon Orbiter

Nuclear Electric Propulsion – NEP.



Democritos EUROPA – INPPS (International Nuclear Power and Propulsion System) Flagship.

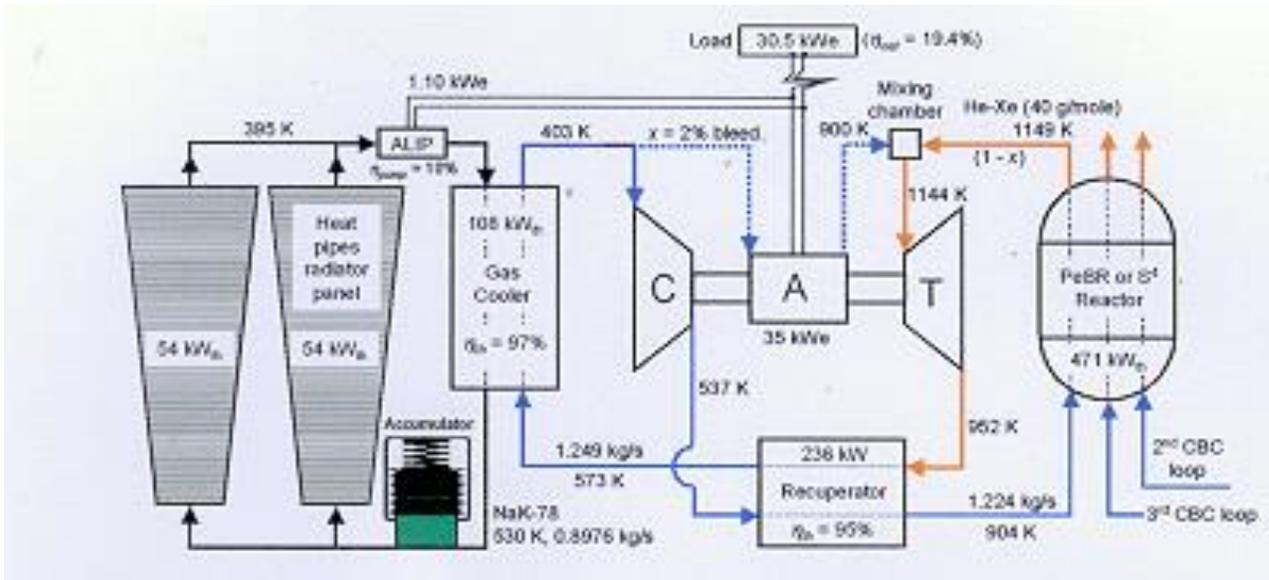
Democritos MARS – INPPS (International Nuclear Power and Propulsion System) Flagship.



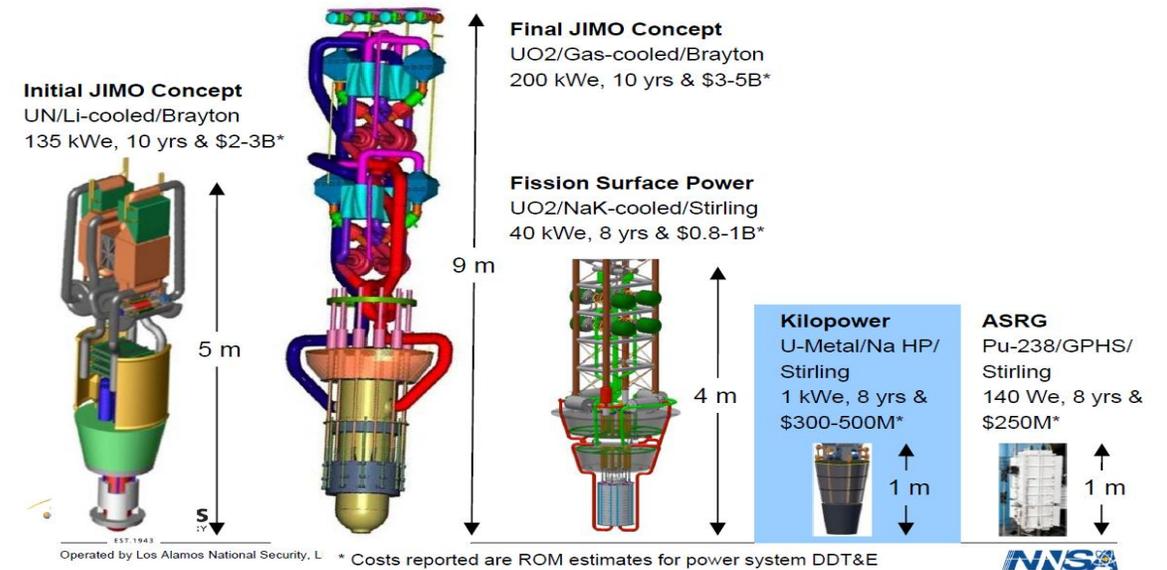
Example of a HALL propulsion device of 6 [kW](#) in operation at Jet Propulsion Laboratory from NASA.

Nuclear Space Propulsion

Design Simplicity... An ideal 1st Step in Space Reactor Technology



Nuclear micro power plant schematic for NEP. (UNM)

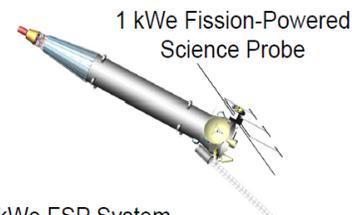


Nuclear Space Propulsion

Projected NASA Applications for Fission Power Systems

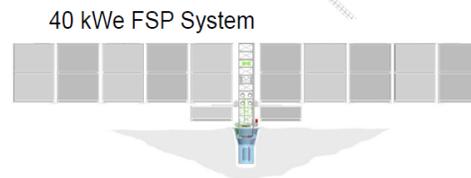
1. Planetary/Space Science

- <1 to 10 kWe
- 10 to 20 yr life
- Unmanned, Autonomous
- Low Mass; Competitive with RTGs
- Non-Obtrusive; Shouldn't interfere with Science Objectives



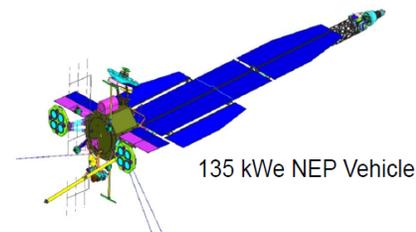
2. Fission Surface Power (FSP)

- 10 to 100 kWe
- 5 to 10 yr Life
- Human-rated
- Robust and Reliable; Mass is Secondary
- Adaptable to Multiple Missions and Environments

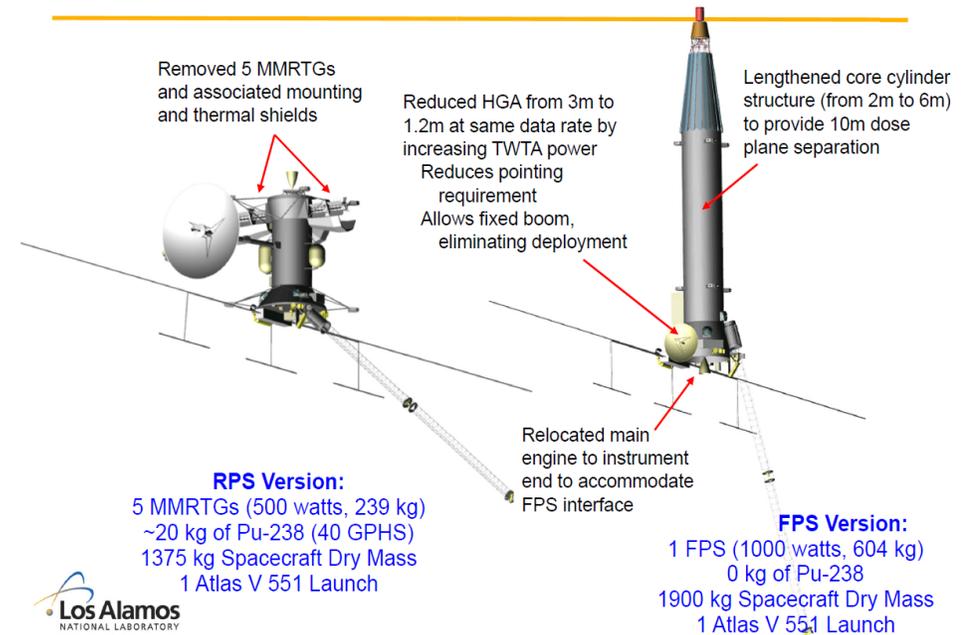


3. Nuclear Electric Propulsion (NEP)

- 100 kWe to Several MWe's
- 5 to 15 yr Life
- Cargo or Piloted Missions to Mars
- Low Specific Mass (kg/kW); Must provide benefits over SEP
- Flexible Operations: Thrust, Coast, Science, Standby



Jupiter Europa Orbiter

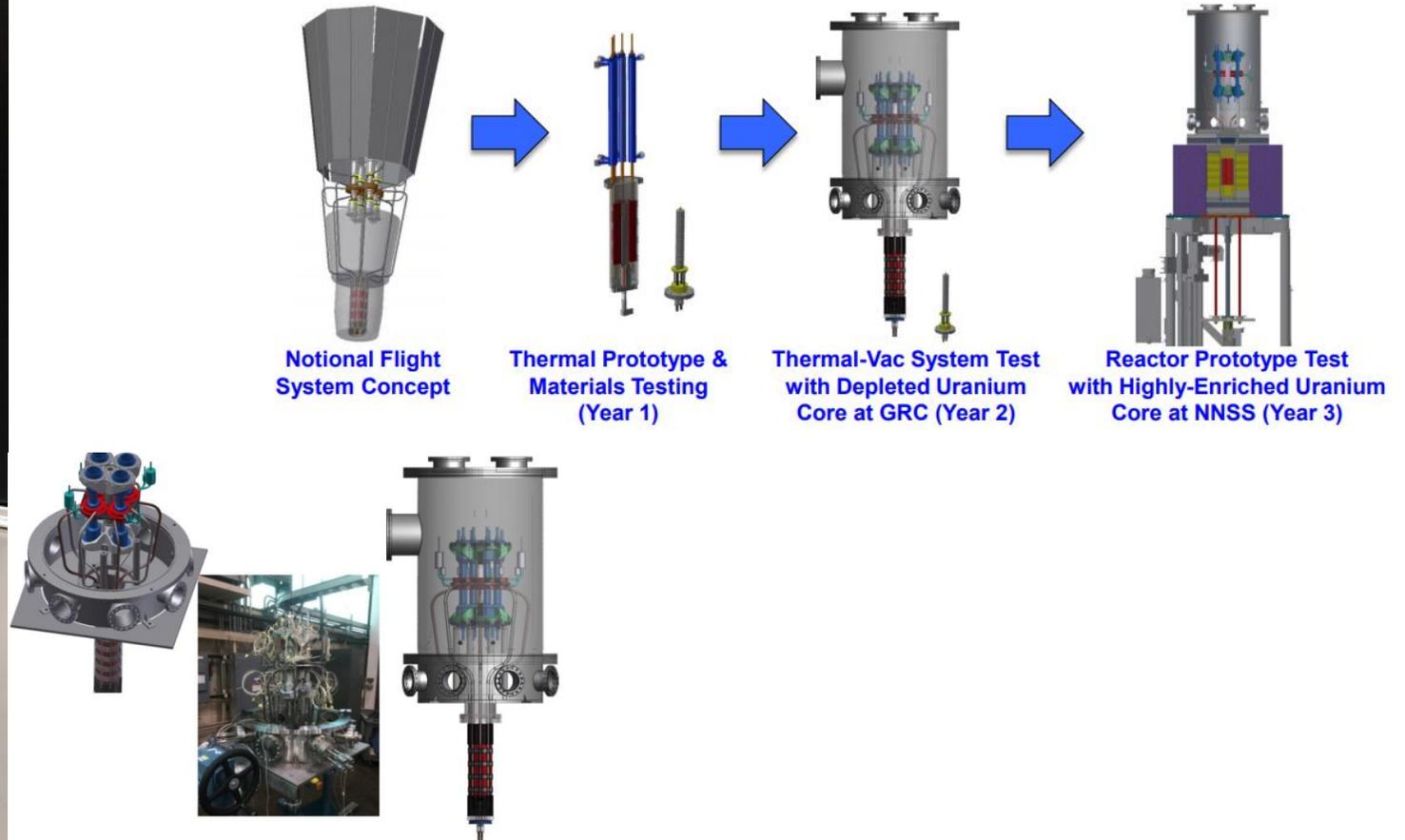
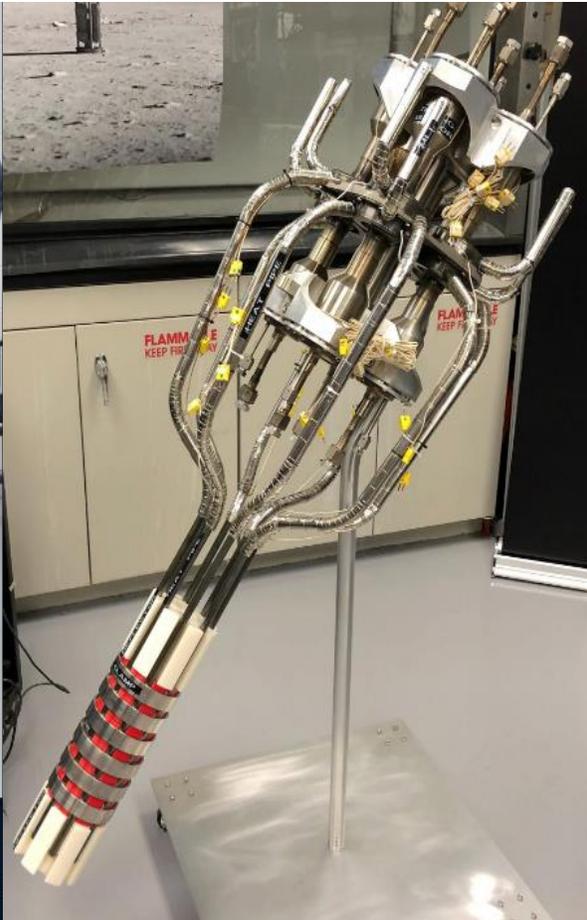


Nuclear Space Propulsion

Kilopower



Marc Gibson, NASA Glenn's Kilopower Lead Engineer, explains the operation of the KRUSTY Kilopower prototype design to members of the media at NASA Glenn's Sterling Research Lab in Cleveland, Ohio. Photo Credit: Michael Cole / Spaceflight Insider



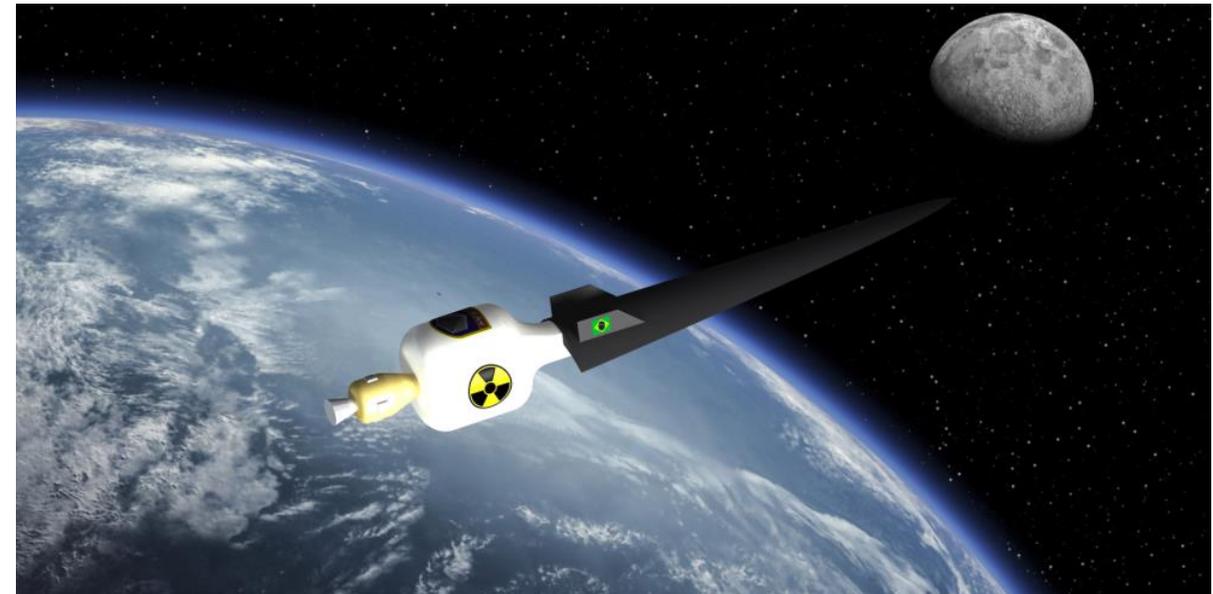


Nuclear Space Propulsion

No
Aerospace



YES
Space

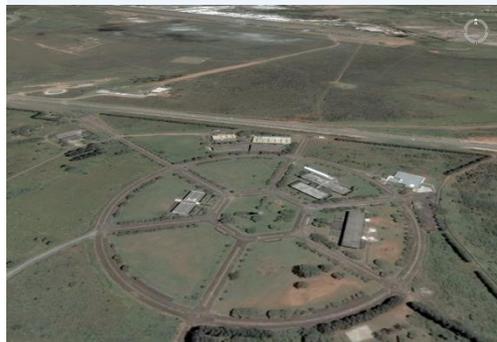




MINISTÉRIO DA DEFESA
COMANDO DA AERONÁUTICA
Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
Instituto de Estudos Avançados

IEAv:

**Tecnologias Inovadoras
para acesso à órbita e ao
espaço profundo**



- ✓ Aerotermodinâmica e Hipersônica
- ✓ Lasers e suas aplicações
- ✓ Sensores
- ✓ Aplicações Nucleares Espaciais
- ✓ EC4ISR



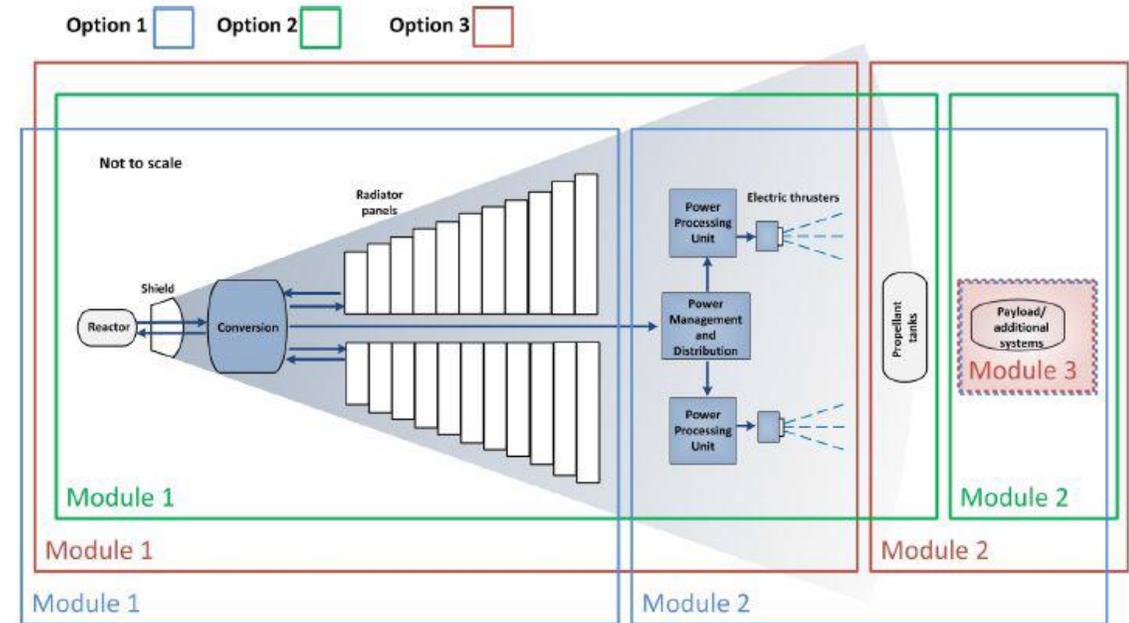
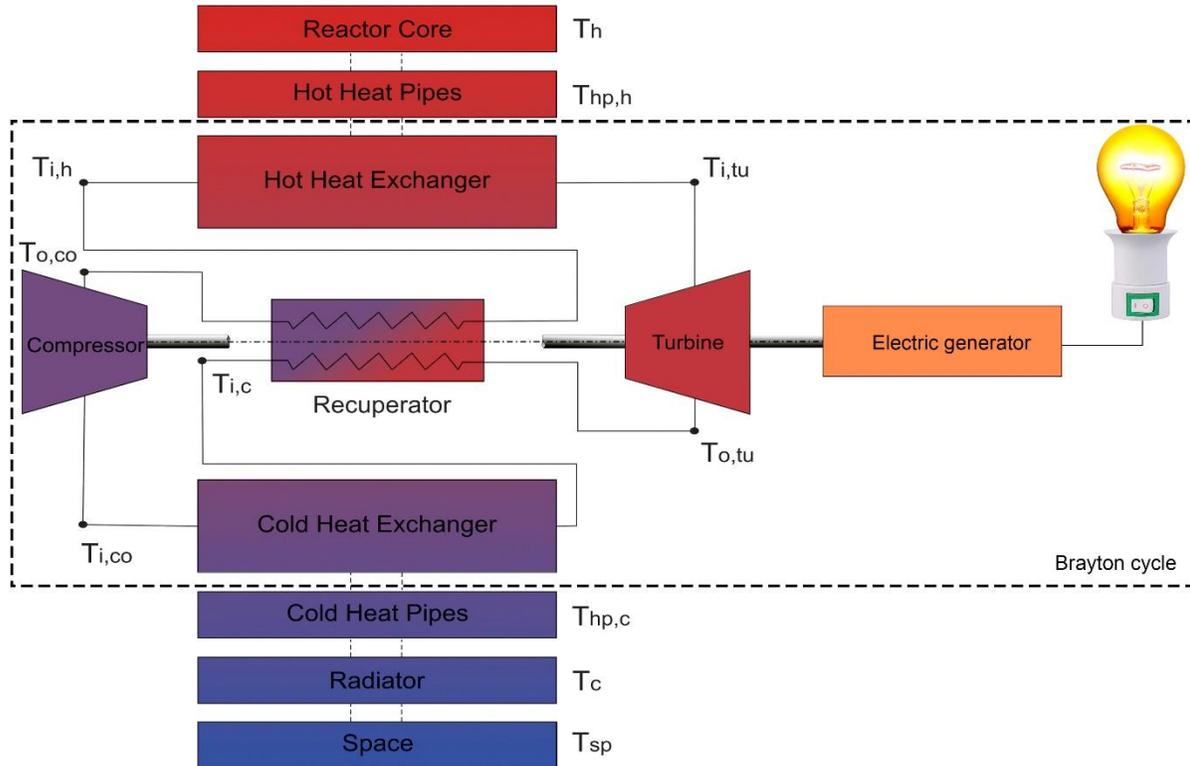
ENU/IEAv nuclear projects.

- Projeto AMAZONAS (1982 – 1991).
- Projeto RESPA (1988 -1992).
- Projeto REARA (1992 – 1999).
- O projeto Amazonas tratava de reatores rápidos de 3.000 MW térmicos, típicos de grande usinas para a malha elétrica Nacional. (Th232)
- O projeto RESPA avaliação do SP-100.
- O projeto REARA tratava de um reator rápido de 60 MW térmicos e seria um protótipo atualizado do reator do projeto Amazonas.
- O projeto TERRA* trata de reatores rápidos de menos que 4 MW térmicos. São microrreatores. Estes reatores tem uso fora da malha elétrica Nacional, mas também tem uso do ponto de vista estratégico para a Aeronáutica 100.

*TERRA is an acronym for “*TEcnologia de Reatores Rápidos Avançados.*”

“Nuclear Electric Propulsion” – Project TERRA.

DEMOCRITOS - Demonstrators for Conversion, Reactor, Radiator And Thrusters for Electric Propulsion Systems “road map” Europeu



TERRA Project general objective.

Tabela de valores de potências de interesse, que justificam a escolha de intervalo de potência do projeto TERRA.

| | Thermal Power (kW) | Electric Power (kW) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Space Shuttle | | 15 |
| ISS | | 75 |
| Moon Settlement | | 10 – 100 |
| Mars (settlement) | | 20 – 60 |
| Mars (space ship) | | 10 – 200 |
| Oil extraction Platform | | 50-100 MW |
| Curiosity | | 0.1 |
| SNAP-10 | 45.5 kW | 0.65 |
| SP-100 | 2000 | 100 |
| Romanshka | 40 | 0.8 |
| Bouk | <100 | <5 |
| Topaz 1 | 150 | 5-10 |
| Topaz 2 | 135 | 6 |
| SAFE 400 | 400 kW | 100 |
| JIMO | 800-1200 kW | 200-300 |
| FSP | 150 kW | 45 |
| MEGAHIT | 4 MW | 1MW |
| DEMOCRITOS | 400 kW | 100 kW |
| Akademic Lomonosov (KLT40S) | 150.000 (X2) | 35.000 (X2) |
| | | |
| Kiwi A | 100 MW | |
| Kiwi B | 1000 MW | |
| Phoebus 1 | 1000 – 1500 MW | |
| Phoebus 2 | 5000 MW | |

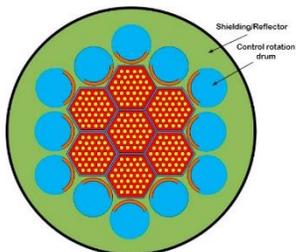
- O objetivo do Projeto TERRA é pesquisar as principais tecnologias para o desenvolvimento de microrreatores rápidos avançados.
- Atualmente, as atividades do Projeto TERRA estão focadas no desenvolvimento de um sistema compacto de geração de energia de múltiplo uso no solo, tendo como visão a utilização da tecnologia nuclear no espaço.
- Os microrreatores nucleares são pequenas unidades capazes de gerar energia elétrica (0,1 – 1000 kW) para diversas aplicações.
- Estas unidades são designadas para serem confiáveis (segurança inerente), transportáveis e longevos (vida longa sem manutenção, > 10 anos).
- Entre as suas aplicações estão
 - ✓ a exploração econômica do espaço, propulsão nuclear elétrica – NEP.
 - ✓ A exploração do petróleo do pré-sal.
 - ✓ E geração de energia elétrica em locais isolados da malha elétrica nacional ou mesmo onde a energia elétrica tenha sido interrompida por razões de catástrofe natural.

“Nuclear Electric Propulsion” – Projeto TERRA.

Tecnologias de interesse.

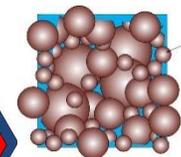
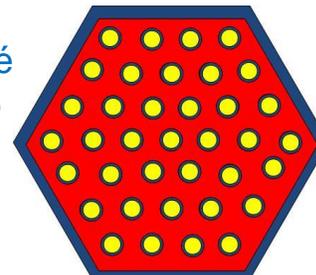
- Simulação computacional de micro núcleos de reatores para geração de potência térmica.
- Desenvolvimento e simulação de ciclos térmicos (Brayton e Stirling) para a conversão termoelétrica e produção de energia elétrica.
- Desenvolvimento e simulação de turbinas de Tesla (TPMF), as quais parecem possuir maior confiabilidade e podem contribuir para aumentar a eficiência de conversão do ciclo Brayton.
- Tubos de calor para condução/rejeição passiva de calor.

Primeiro conceito de núcleo do micro reator TERRA, simulação computacional.



A distância entre lados do hexágono é de 12,5 cm.
A altura ativa do núcleo é de 35 cm.

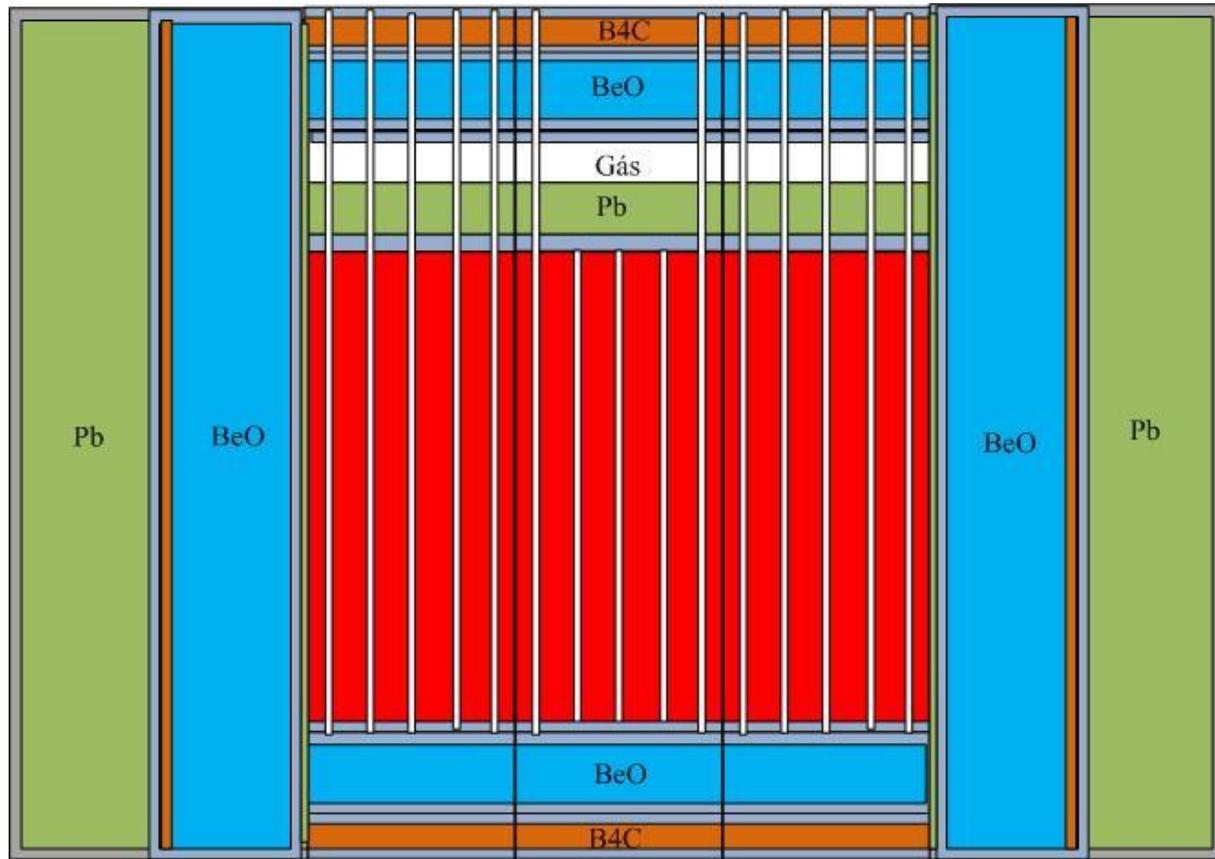
Combustível nuclear é uma mistura de micro esferas e chumbo, e corresponde a região vermelha da figura.



O combustível está na forma de micro esferas de três tamanhos diferentes. O interior das esferas é constituído de nitreto de urânio. O chumbo líquido permeia os espaços entre esferas.

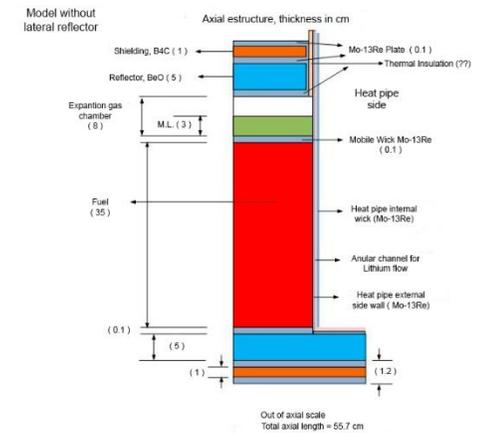
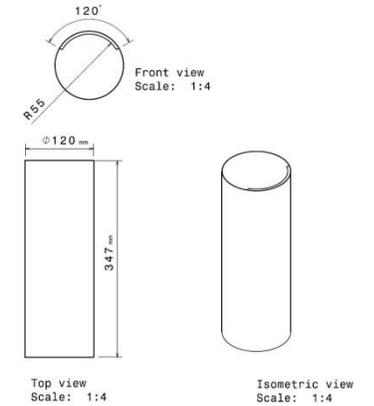
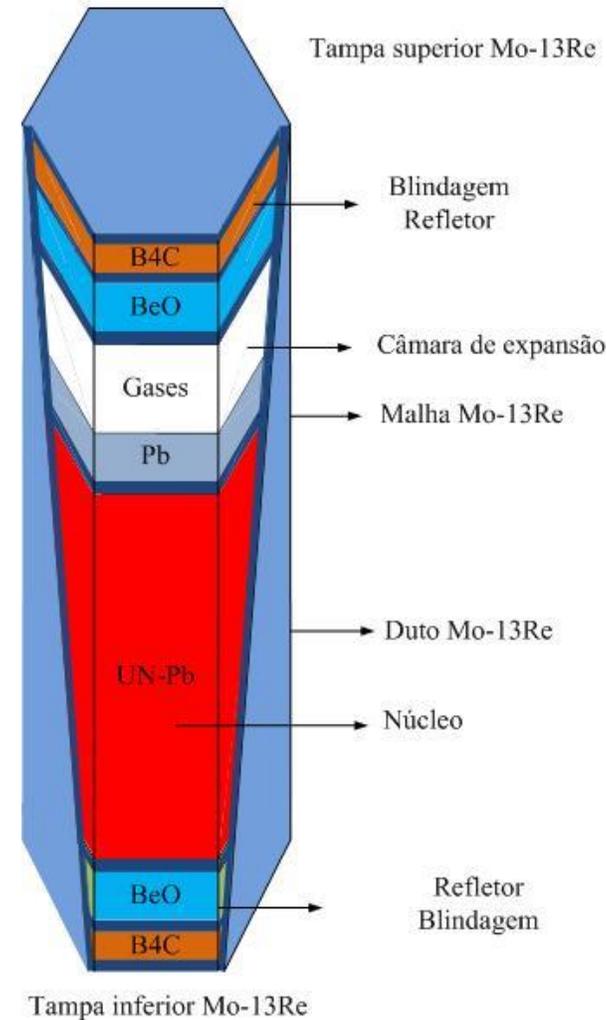
Os círculos amarelos representam tubos de calor.

First micro reactor core for TERRA project



Fora de escala
Comprimento axial total = 55,6 cm

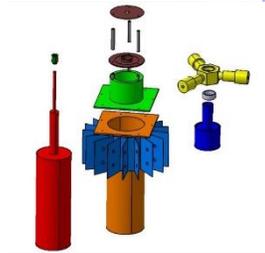
ELEMENTO COMBUSTÍVEL



Stirling machine development

Máquina Stirling Conversor para baixa potência. Primeira máquina

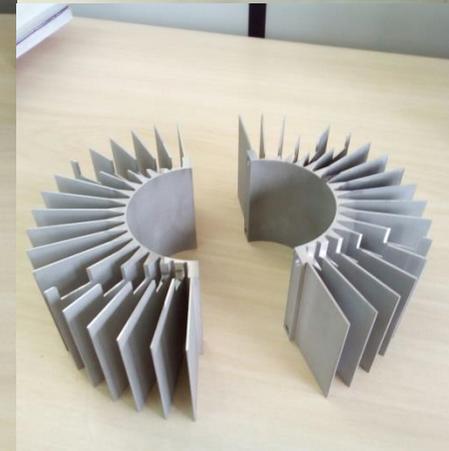
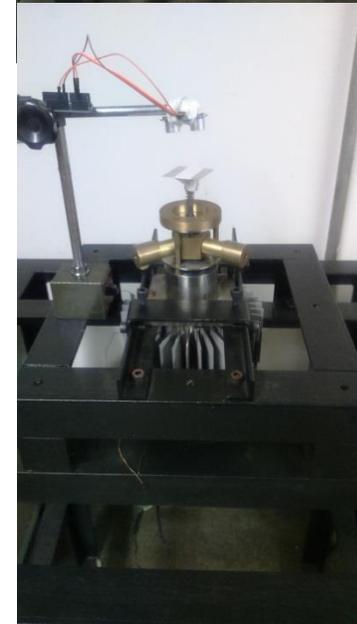
A máquina Stirling tanto pode ser utilizada como conversor termoelétrico para sistema de fissão de baixa potência, como conversor termoelétrico que utiliza calor produzido pelo decaimento radioativo. Em geral seu uso fica restrito a faixa de potência 0,1 a 50 kW elétricos.



Desenho que falhou.



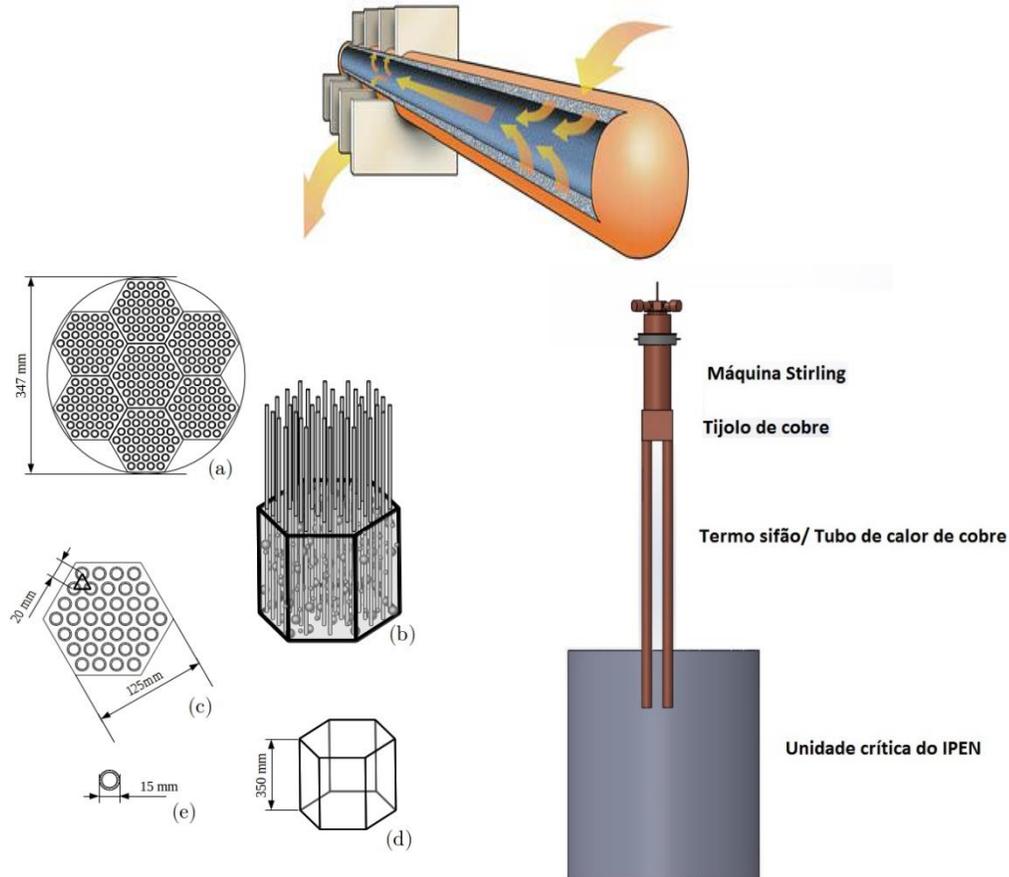
Segunda e terceira máquinas.



Heat Pipe development

Tubo de calor

Utilizado para transferir calor do núcleo para o Sistema conversor de energia termoelétrica e para rejeição de calor residual.



Primeiro passo para um sistema de rejeição de calor residual.

Experimento do termo sifão, feito de tubo de cobre e utilizando água como fluido de trabalho.

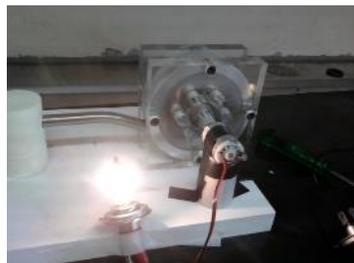
Experimento do tubo de calor, feito de tubo de cobre e utilizando água como fluido de trabalho.



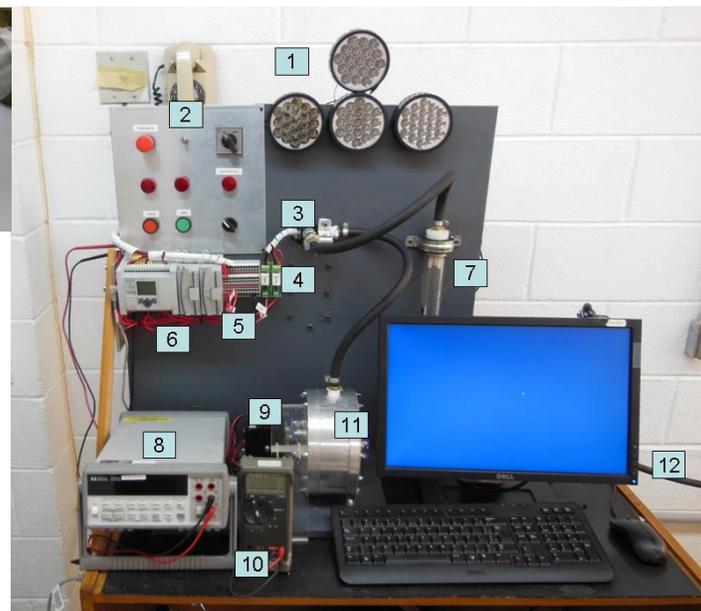
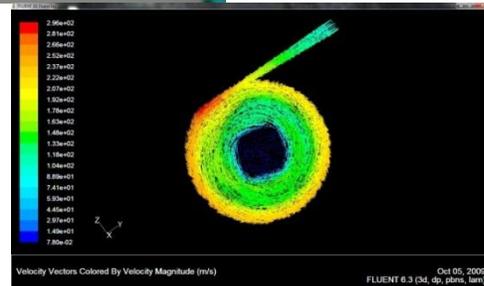
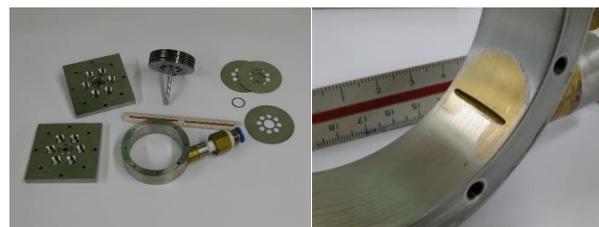
Multi Fluid Passive Turbine TPMF development

Desenvolvimento da turbina de TESLA, espera-se melhorar a eficiência do ciclo Brayton.

Acendendo uma lâmpada de 55W.



Turbina de Tesla feita em SS 316 atingiu 65.000 RPM.



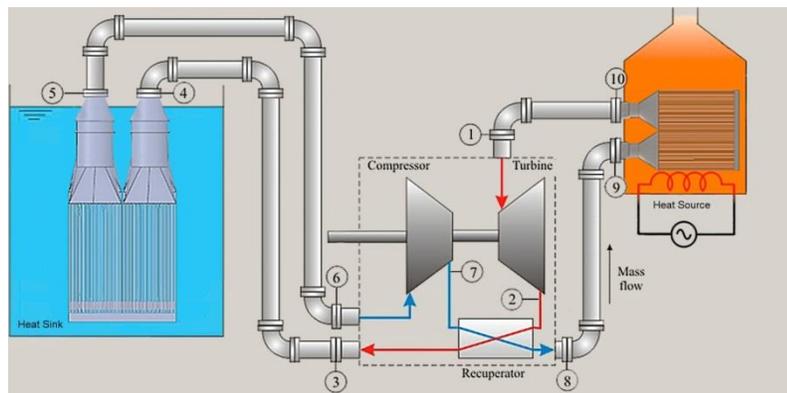
Controle de potência simples aplicado a TPMF

1. Conjunto de lâmpadas LED a serem alimentadas pela corrente gerada pela TPMF.
2. Painel luminoso para indicar operação do Sistema.
3. Válvula de regulagem de vazão de ar.
4. Relê de acoplamento.
5. Contatos.
6. CLP.
7. Medidor de vazão.
8. Medidor de corrente.
9. Alternador.
10. Voltímetro.
11. TPMF-3.
12. Entrada de ar comprimido.

Desenvolvimento e teste da TPMF.

TPMF é uma evolução da turbina original de Tesla.

Brayton cycle convertor development

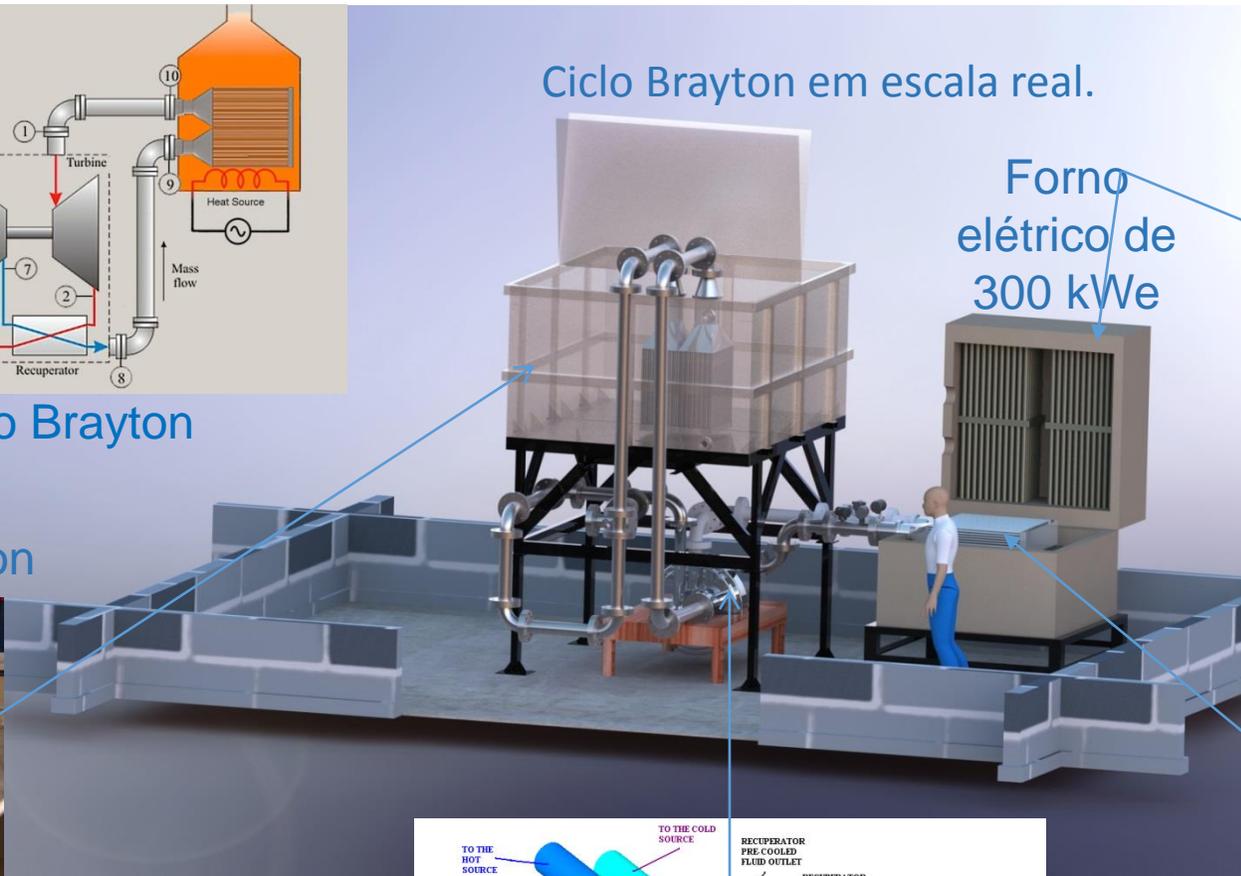


Esquema do ciclo Brayton

Fonte fria do ciclo Brayton



Ciclo Brayton em escala real.

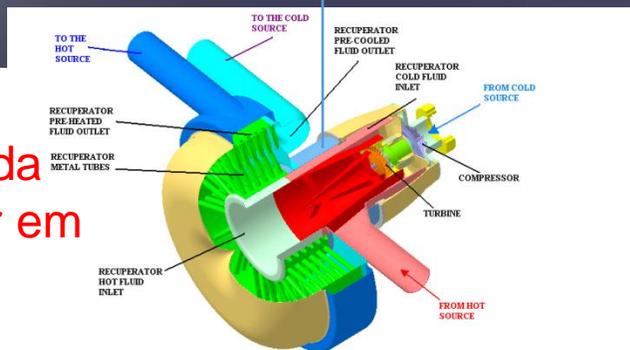


Forno elétrico de 300 kWe



Trocador de calor da fonte quente do ciclo.

APU NOELLE 60290 adaptada para funcionar em ciclo fechado.





Final Considerations.

- Esta apresentação descreve o trabalho realizado até o momento no projeto TERRA. Este trabalho inclui a construção do CBF, o sistema de rejeição de calor residual e desenvolvimento de conceitos para elementos combustíveis e núcleos de microrreatores nucleares.
- O CBF é um protótipo para conversão de calor em energia elétrica. É, também, um testador de futuras e potenciais tecnologias para serem empregadas no espaço, como por exemplo turbinas tipo TESLA, tubos de calor e, até mesmo, máquinas Stirling.
- O CBF tem uma seção de tubulação especialmente projetada para teste de tubos de calor e seus sistemas, uma vez que espera-se utilizar este sistema como rejeitadores de calor passivo, no espaço.
- O projeto TERRA, no momento, não possui uma data de envio para o espaço, desta tecnologia. Trabalha-se com a finalidade de prover uma opção viável para tal. No entanto, prevê-se que haverá um forte direcionamento para exploração da Lua, de Marte e do Cinturão de Asteróides logo após 2020.
- Considera-se de relevância a parte de simulação numérica e compreensão tecnológica de princípios básicos, isto justifica os investimentos em computação e simulação numérica.



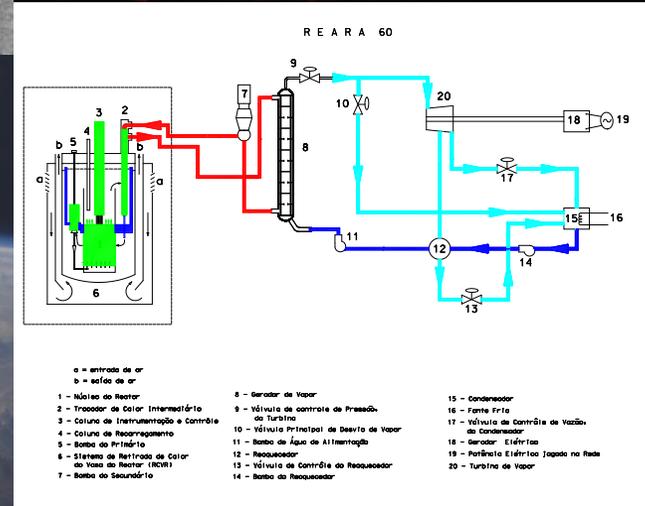
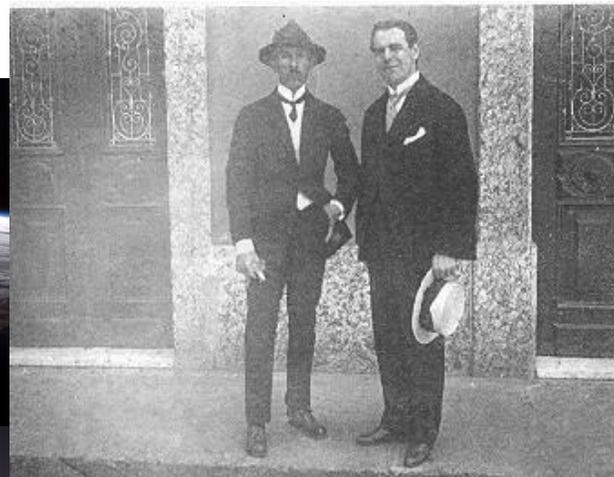
Final Considerations.

- A parte nuclear deste projeto vem sendo desenvolvida basicamente por simulação numérica. Isto é feito para garantir o mais alto grau de segurança e confiabilidade possíveis. Este fato, também, provê oportunidade para se evoluir com conceitos de combustível, materiais e geometria de núcleo. Acredita-se que este “modus operandi” facilitará a busca por resultados experimentais necessária a ser empreendida em futuro breve.
- Uma opção intermediária que se considera é o uso desta tecnologia para geração de calor e/ou energia elétrica em profundidades abissais.

Muito obrigado pela atenção.

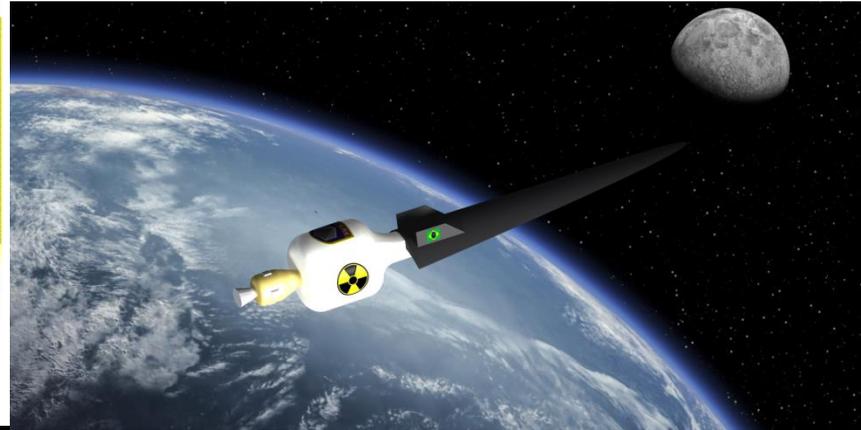
Santos Dumont com Álvaro Alberto, 12 de Novembro de 1918

(de João Carlos Vitor Garcia, Álvaro Alberto – A Ciência do Brasil)





Merry Christmas and a very happy New Year



From IEAV/TERRA - Brazil