



Title: Thermodynamic Analysis of a Nuclear Heat Source Stirling Cycle for Aerospace Applications

Authors: DIAZ-ESPINOZA, Gerardo, GALLARDO-VILLARREAL, José Manuel and VALLE-HERNANDEZ, Julio

Editorial label ECORFAN: 607-8695
BCIERMMI Control Number: 2022-01
BCIERMMI Classification (2022): 261022-0001

Pages: 15
RNA: 03-2010-032610115700-14

ECORFAN-México, S.C.
143 – 50 Itzopan Street
La Florida, Ecatepec Municipality
Mexico State, 55120 Zipcode
Phone: +52 1 55 6159 2296
Skype: ecorfan-mexico.s.c.
E-mail: contacto@ecorfan.org
Facebook: ECORFAN-México S. C.
Twitter: @EcorfanC

www.ecorfan.org

Holdings		
Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua

Introducción

Metodología

Desarrollo de la Metodología

Resultados

Conclusiones

Referencias



ECORFAN®



Introducción

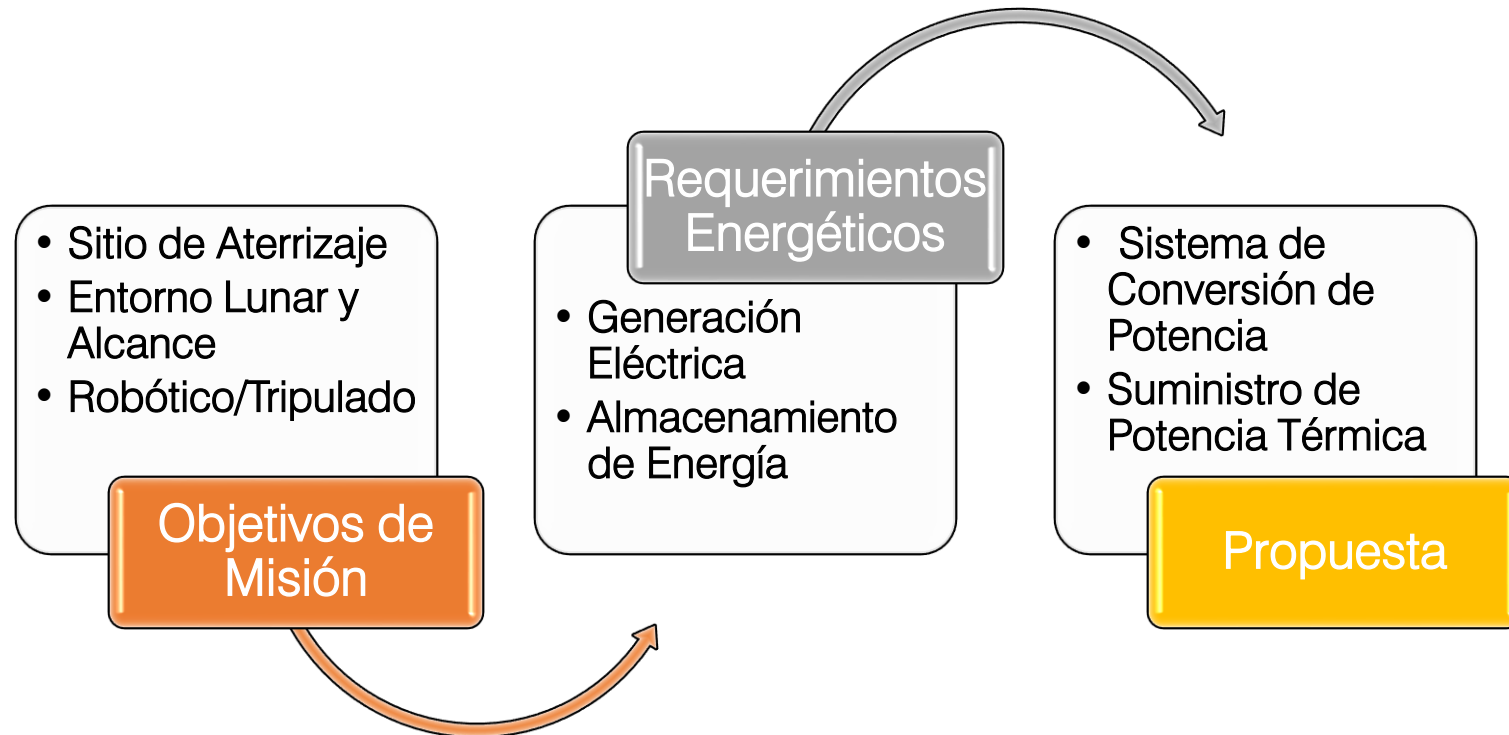


Figura 1. Planteamiento del Problema y Solución (1)



Introducción

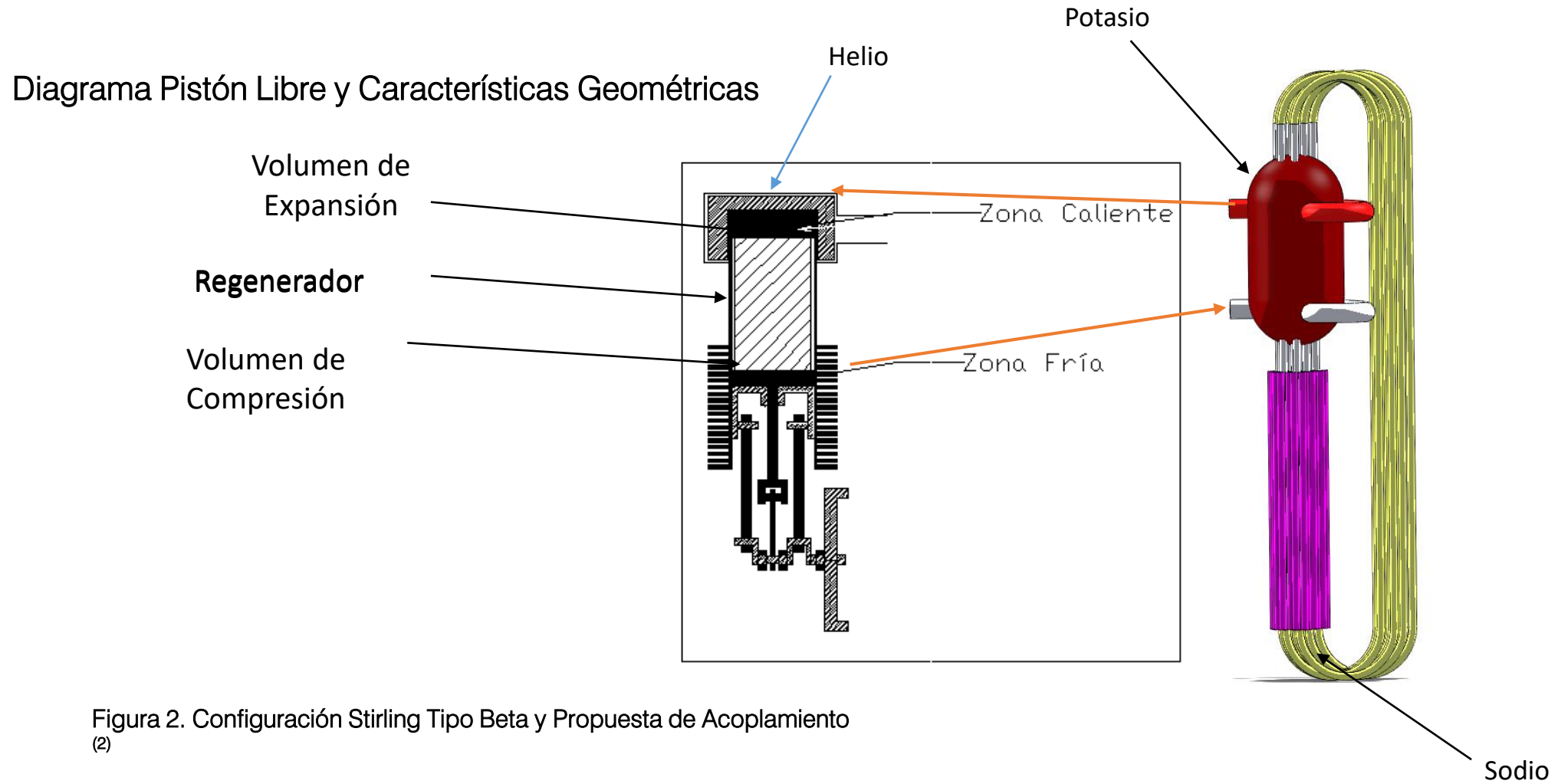
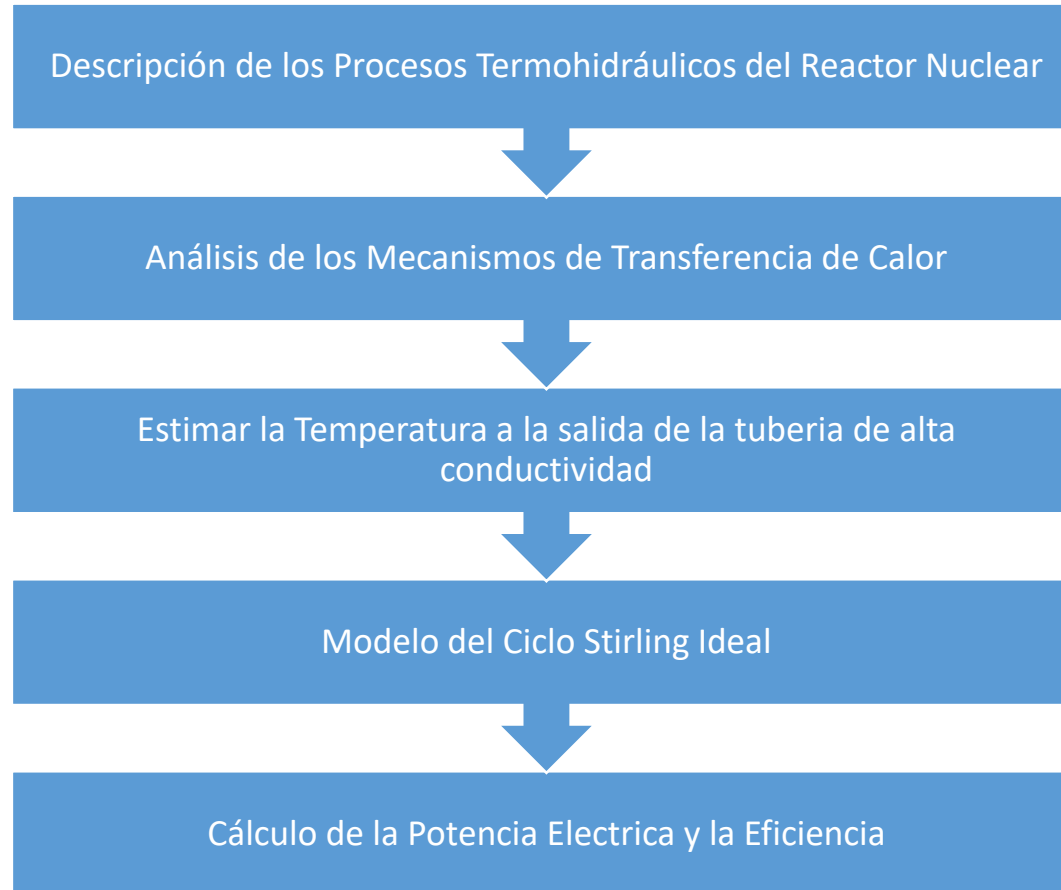


Figura 2. Configuración Stirling Tipo Beta y Propuesta de Acoplamiento
(2)

Metodología



ECORFAN®



Desarrollo de la Metodología

1. Descripción de los Procesos Termohidráulicos

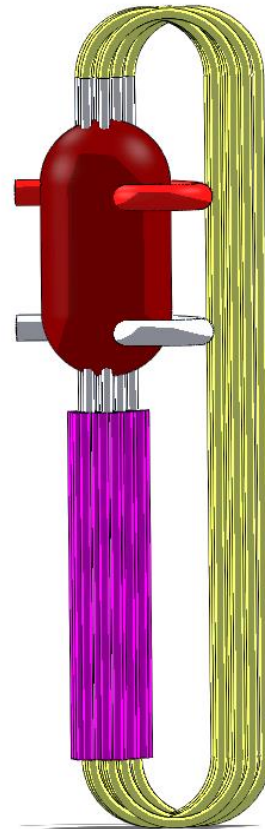


Figura 3. Diagrama de Configuración del Sistema

Desarrollo de la Metodología

2. Análisis de los Mecanismos de Transferencia de Calor

$$Q = \frac{2\pi Lk(T_{PI} - T_{PE})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (1)$$

$$Q = 2\pi r_1 Lh(T_{PE} - T_\alpha) \quad (2)$$

$$Q = mC_p \left(\frac{dT_\alpha}{dt}\right) \quad (3)$$



ECORFAN®

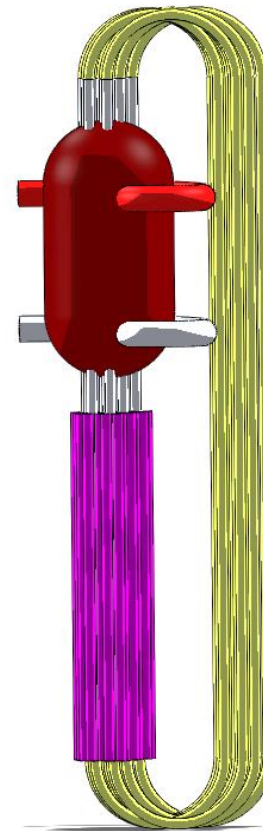


Desarrollo de la Metodología

3. Estimación de la Temperatura

Parámetros Propuestos	
Presión Inicial (kPa)	200
Relación de Compresión	1.8
Velocidad angular (rpm)	1500
Volumen Geométrico (m^3)	0.009

Tabla 1 Parámetros Propuestos para el Modelo del Motor Stirling



\dot{Q} (kWt) ₍₁₎	T_{sodio} (K)	$T_{potasio}$ (K)	T_{helio}
24	1173	1031	973

Figura 3. Propuesta de Configuración de Transporte de Calor
(2)

Desarrollo de la Metodología



ECORFAN®

4. Modelo del Ciclo Stirling Ideal ^(VII)

Modelo de Primer Orden
Proceso de Expansión y Compresión se considera Isotérmico
Condiciones de Gas se considera Ideal
No hay perdidas en la regeneración
No hay perdidas en los intercambiadores de calor
La temperatura en la expansión y compresión se mantienen constante en los puntos muertos superiores.

Tabla 2. Consideraciones del Modelo Stirling Ideal



Desarrollo de la Metodología



ECORFAN®

Se establece el primer acercamiento con respecto al Ciclo Termodinámico Stirling Ideal_(VII)

$$\Delta U = Q - W$$

Primera Ley de la Termodinámica

$$PV = mRT$$

Ley del Gas Ideal

$$W = \int p dV$$

Trabajo Reversible para un Sistema Cerrado

Proceso 1-2	Expansión Isotérmica
Proceso 2-3	Enfriamiento Regenerativo
Proceso 3-4	Compresión Isotérmica
Proceso 4-1	Calentamiento Regenerativo

\dot{Q} (kWt)	T_1 (K)	P_1 (kPa)	V_1 ($\frac{m^3}{kg}$)	T_3 (K)
24	973	200	10.07	600

Tabla 3 Parámetros Iniciales para el Modelado del Motor Stirling



Desarrollo de la Metodología

5. Cálculo de la Potencia Eléctrica y Eficiencia

Haciendo uso de los valores obtenidos en cada proceso, se procede a determinar la eficiencia y potencia mecánica con base en las siguientes ecuaciones^(VII)

$$\eta = \frac{W_T}{Q_e}$$

Siendo W_T el trabajo neto en la variación del trabajo de expansión y de compresión, y Q_e el calor en la zona de compresión.

$$Pot = \frac{W_T * \dot{n}}{n_{rev}}$$



ECORFAN®

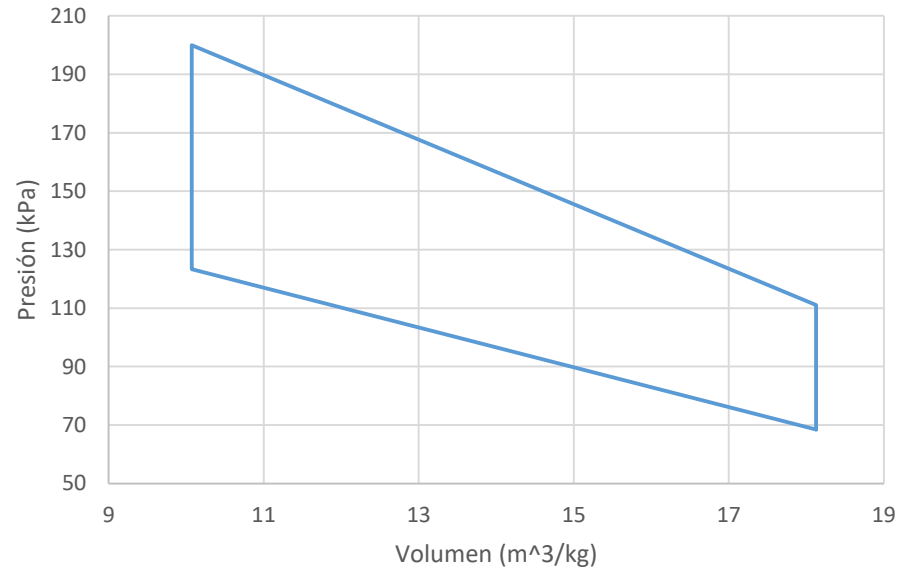


Resultados y Discusión

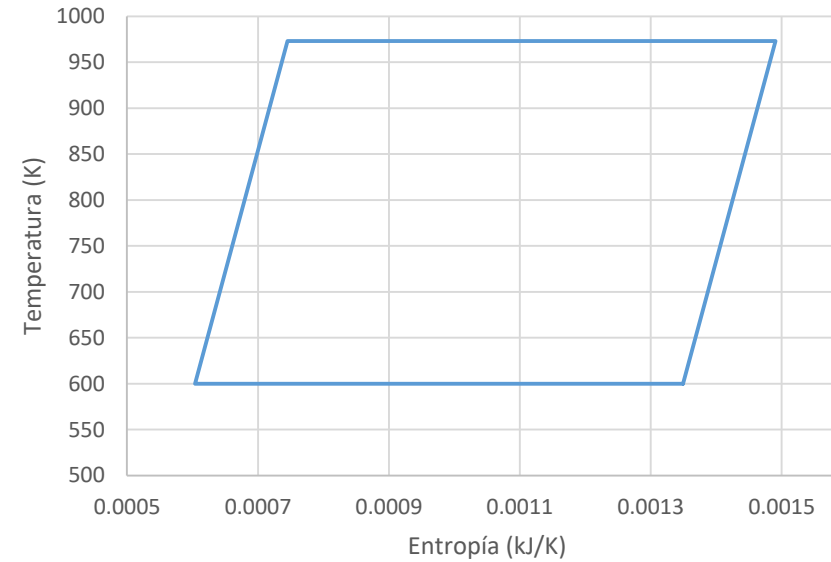


ECORFAN®

Se llegó a los siguientes resultados representando el comportamiento del sistema con las características de los parámetros iniciales propuestos a través del modelado matemático que se hizo.



Gráfica 1 Diagrama PV Ideal



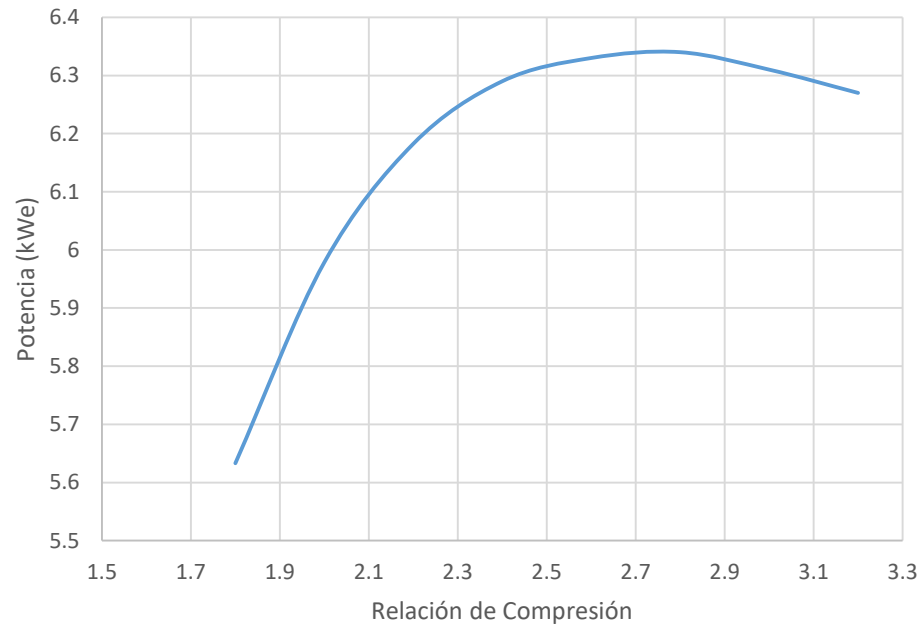
Gráfica 2 Diagrama TS Ideal



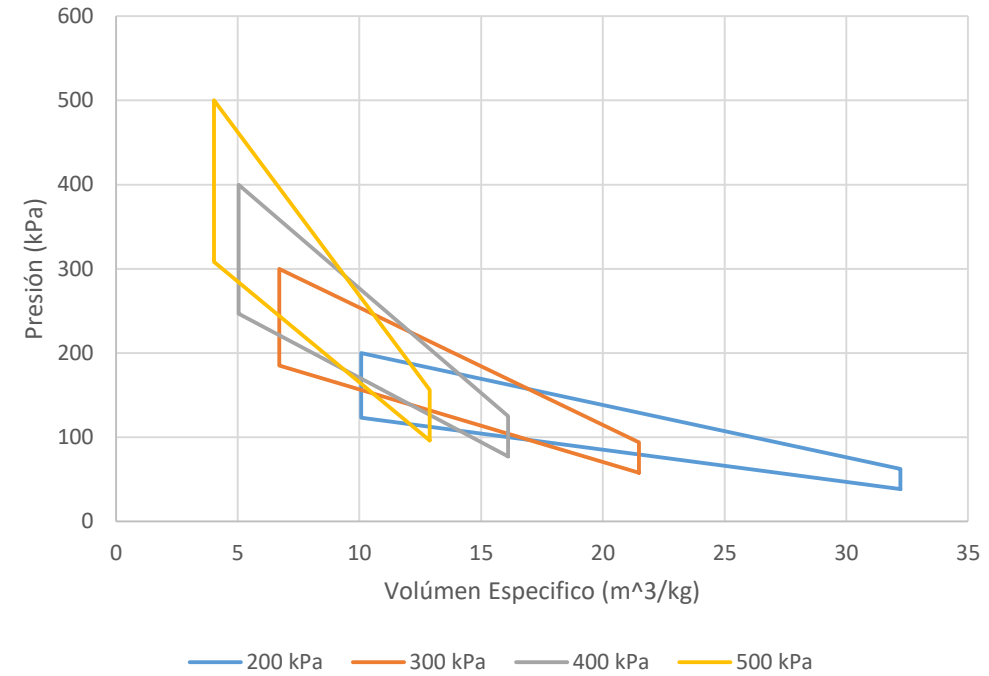
Resultados y Discusión



ECORFAN®



Gráfica 3 Variación de Relación de Compresión



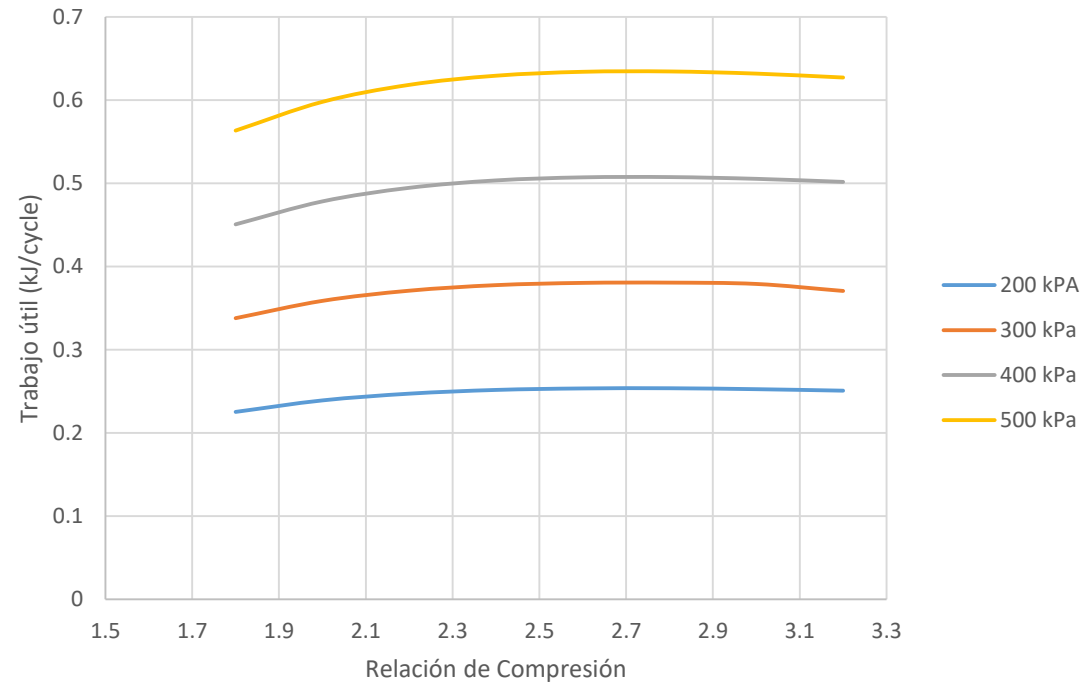
Gráfica 4 Variación de Presión en Zona de Expansión



Resultados



ECORFAN®



Gráfica 5 Variación de Trabajo Útil debido a la Relación de Compresión



Conclusiones

Conforme a las características de alta eficiencia, ventajas estructurales, tamaño, peso, vida útil y uso de un sistema regenerador, se determinó que el motor de Ciclo Stirling es el convertidor de potencia más viable para suministrar la energía eléctrica en un hábitat lunar que emplee una fuente de energía nuclear.

Se observó que al incrementar de la relación de compresión la potencia aumenta, sin embargo, en cierto punto la potencia comienza a disminuir presentando bajo rendimiento, lo que nos permite definir el valor de relación de compresión óptima para el sistema.

Además, tomando en cuenta que los requerimientos de potencia eléctrica no son tan altos, se ha decidido mantener una velocidad angular relativamente baja, esto con base en los resultados mostrados en la gráfica ..

La verificación de este modelo se realizó a partir de los resultados presentados en el artículo **A Basic LEGO Reactor Design for the Provision of Lunar Surface Power. United States** (1), que define una potencia eléctrica suministrada por el reactor nuclear de 5.63kWe.



ECORFAN®



Referencias

- I. Cataldo, Robert L. (1993) Power Requirements for the First Lunar Outpost (FLO). Lewis Research Center. Cleveland, Ohio. NASA. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930006334/downloads/19930006334.pdf>
- II. Bess, John Darrell. A Basic LEGO Reactor Design for the Provision of Lunar Surface Power. United States. (INL/CON--08-14353) <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/4010758.pdf>
- III. Tournier, Jean-Michel & El-Genk, Mohamed. (2005). Liquid Metal Heat Pipes Radiator for Space Nuclear Reactor Power Systems. Collection of Technical Papers - 3rd International Energy Conversion Engineering Conference. DOI:10.2514/6.2005-5701. https://www.researchgate.net/publication/268572847_Liquid_Metal_Heat_Pipes_Radiator_for_Space_Nuclear_Reactor_Power_Systems
- IV. Mohamed S. El-Genka (2011) USES OF LIQUID-METAL AND WATER HEAT PIPES IN SPACE REACTOR POWER SYSTEMS. Institute For Space and Nuclear Power Studies, Chemical & Nuclear Engineering Dept., University Of New Mexico, Albuquerque, NM 87131, USA. DOI: 10.5098/Fhp.V2.1.3002. https://www.researchgate.net/publication/268572847_Liquid_Metal_Heat_Pipes_Radiator_for_Space_Nuclear_Reactor_Power_Systems
- V. Ehud Greenspan (2008) Solid-Core Heat-Pipe Nuclear Battery Type Reactor. University of California Department of Nuclear Engineering Berkeley. DE-FC07-05ID14706 <https://www.osti.gov/servlets/purl/940911>
- VI. G. Sofer. (1961) Conceptual Design And Economic Evaluation Of A Steam-cooled Fast Breeder Reactor. United States Atomic Energy Commission. NSA-15-021888 <https://www.osti.gov/biblio/4769045-evaluation-steam-cooled-fast-breeder-reactors>
- VII. Cengel, Yunus A. (2004) TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. Fundamentos y aplicaciones. University of Nevada, Reno. https://www.academia.edu/12140362/Transferencia_de_Calor_y_Masa_4ta_ed_Yunus_Cengel
- VIII. Urieli, Israel (1977) A Compute Simulation of Stirling Cycle Machines. Faculty of Engineering, University of the Witwatersrand, Johannesburg. https://www.ohio.edu/mechanical-faculty/urieli/Izzi_PhD_thesis.pdf
- IX. Mason, Lee S. (2001) A Comparison of Brayton and Stirling Space Nuclear Power Systems for Power Levels from 1 Kilowatt to 10 Megawatts. Gleen Research Center, Cleveland, Ohio. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20010016863/downloads/20010016863.pdf> DOI:10.1063/1.2169203
- X. Martini, William (1983) Stirling Engine Design Manual. Lewis Research Center. U.S. Department of Energy. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19830022057/downloads/19830022057.pdf>



ECORFAN®





ECORFAN®

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- (www.ecorfan.org/booklets)