



ANÁLISE PRELIMINAR DE POTENCIAL DE UM SISTEMA DE REAPROVEITAMENTO DE CALOR NA ESTAÇÃO ESPACIAL INTERNACIONAL

Diego Bandeira de Melo Akel Thomaz, dbdmat.eng16@uea.edu.br¹
Tássia Carolina Forasteiro Pinto, tcfp.eng16@uea.edu.br¹

¹Universidade do Estado do Amazonas – Escola Superior de Tecnologia. Avenida Darcy Vargas, 1200 – Parque Dez de Novembro, Manaus – AM, 69050-020

Resumo. *Por estar em um ambiente de quase vácuo completo, a Estação Espacial Internacional (EEI) não pode contar com condução ou convecção para realizar o controle térmico. Contudo, calor está sendo constantemente produzido dentro da estação por meio de perdas inerentes aos seus diversos sistemas elétricos e pelos corpos dos seus habitantes. Para lidar com esse problema e manter uma temperatura agradável aos seus tripulantes e necessárias para alguns sistemas e experimentos, a EEI possui um sistema ativo de controle térmico. A proposta desse trabalho é utilizar parte da energia transmitida através desse sistema para a conversão de energia térmica em elétrica através de um Ciclo Rankine Orgânico. O sistema proposto resultou em 26% de eficiência, correspondente a 14,67% da potência elétrica instalada na EEI. Caso viável, essa ferramenta pode ser aplicada em missões espaciais tripuladas de longa duração, as quais dependem de um sistema com alta eficiência energética.*

Palavras chave: *EEI, Rankine, cogeração, reaproveitamento.*

1. INTRODUÇÃO

A Estação Espacial Internacional (EEI) teve a sua construção iniciada em 1998 e os seus primeiros habitantes enviados em 2000, desde então tem sido habitada ininterruptamente por no máximo 6 passageiros, tendo sido um deles o brasileiro Marcos Pontes. A EEI é considerada por muitos a construção mais cara e complexa já feita pela humanidade, um feito realizado em conjunto por vários países. É o principal e único posto para certos tipos de experimentos e tem como um dos objetivos ser uma base de aprendizado sobre a vida dos humanos e de outras espécies no espaço, servindo como conhecimento para futuras missões tripuladas de média e longa duração para outros corpos celestes como Marte (Kitmacher et al., 2005)

A EEI está a, aproximadamente, quatrocentos quilômetros do nível do mar. Perto o suficiente para possuir um arrasto atmosférico significativo, devido sua alta velocidade e grande superfície, e precisar da ajuda de pequenas queimas de combustível por meio de veículos visitantes para reajustar a altura, mas longe o suficiente para não apresentar transferências significativas de calor com a atmosfera terrestre através de condução ou radiação.

Existem três formas de se transmitir energia por calor, sendo elas: condução, convecção e radiação. Condução é transferência de calor através de contato entre corpos, convecção através de um fluido e radiação através de emissão de ondas eletromagnéticas (Lienhard e Lienhard, 2000). Devido a atmosfera rarefeita em torno da EEI, as transferências por condução e convecção são insignificantes, fazendo com que a estação dependa da transferência por radiação para realizar o seu controle térmico, como normalmente é feito, exemplificado em Hanford e Ewert (1996) e Barja et al. (2006).

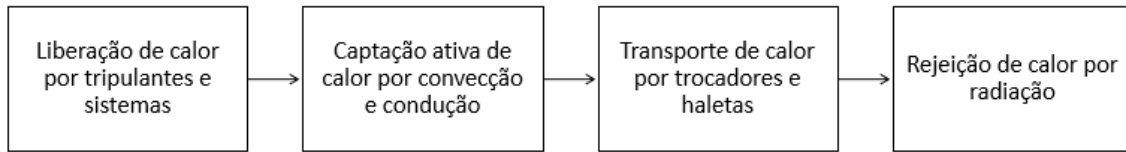
Aqui, na superfície da Terra, estamos acostumados com condução e convecção, sendo estas as principais responsáveis por proporcionar as temperaturas que precisamos para viver confortavelmente através de sistemas de refrigeração ou aquecimento. Devido seu entorno inóspito a EEI, assim como outros objetos espaciais, experimenta altos gradientes de temperatura (Gilmore, 2002). Para proporcionar temperaturas habitáveis aos astronautas e necessárias para o bom funcionamento dos equipamentos e experimentos instalados, a EEI possui camadas de isolamento térmico. Através desse Sistema Passivo de Controle de Temperatura (SPCT) é possível garantir que a estação estará protegida contra as condições do seu entorno, essa é uma das formas de controle térmico demonstradas em Karam (1998).

Contudo, a EEI fica tão bem termicamente isolada pelo SPCT que o calor produzido pelos cabos de transmissão elétrica, instrumentos elétricos, experimentos e pelos corpos dos astronautas não possui um meio para ser liberado e caso isso não aconteça, a estação superaquecerá. Para lidar com isso, um Sistema Ativo de Controle de Temperatura (SACT), que utiliza de bombas para transportar fluidos, foi projetado por empresas parceiras da NASA.

1.1. Organização do SACT

O SACT funciona de acordo com o diagrama ilustrado na Fig. 1:

Figura 1. Diagrama de blocos do Sistema Ativo de Controle de Temperatura



- **Liberção de calor por tripulantes e sistemas:** Todos os equipamentos eletrônicos, assim como os tripulantes, estão o tempo todo liberando calor para o ambiente.

- **Captação ativa de calor por convecção e condução:** É feita através do Sistema Ativo Interno de Controle Térmico (SAICT). Esse sistema é o responsável por manter os equipamentos da estação em temperaturas adequadas para seu funcionamento através de aletas e trocadores de calor. O fluido responsável por capturar o calor desses equipamentos é a água. O SAICT funciona em dois loops independentes: o Loop de baixa temperatura (LBT) e o Loop de Média Temperatura (LMT). Essa organização é uma redundância do sistema, separando a troca de calor de várias utilidades dentro da estação, para caso haja falhas. Cada um desses loops é responsável por refrigerar sistemas diferentes, como mostra as Fig. 2 e Fig. 3. No entanto, se necessário, é possível que os dois atuem em conjunto para reduzir os esforços nas bombas.

Figura 2. Loop de Baixa Temperatura

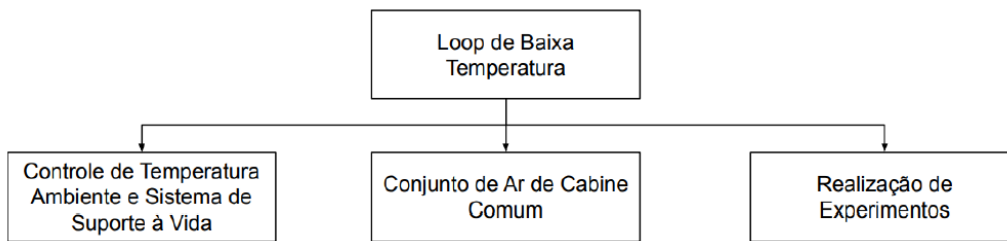
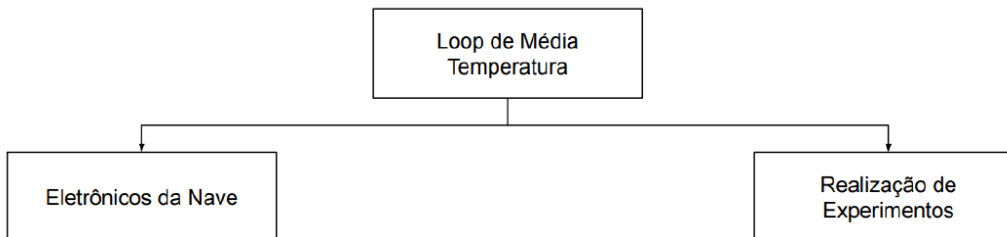


Figura 3. Loop de Média temperatura



O LBT foi projetado para trabalhar a 277 K, e possui 63 litros de líquido refrigerante (água) disponíveis. Já o LMT nominalmente opera a 290 K e possui aproximadamente 200 litros de água.

- **Transporte de calor por trocadores e aletas:** Esses equipamentos são responsáveis por servir como uma interface entre o SAICT e o Sistema Ativo Externo de Controle Térmico (SAECT), transportando o calor recebido pela água para o fluido refrigerante externo, a amônia. O SAICT utiliza 10 trocadores de calor (Fig. 4) e 10 aletas (Fig. 5).

Figura 4. Trocador de calor (Boeing, 2019)

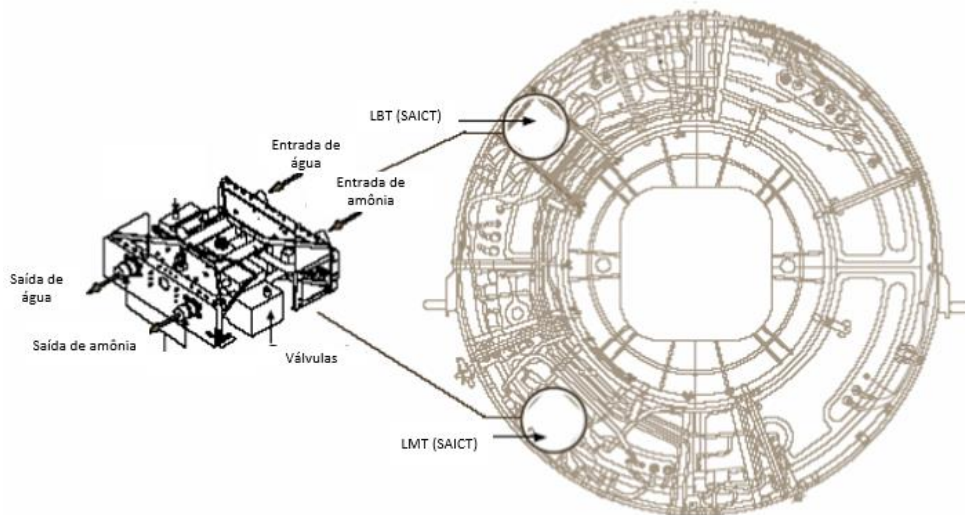


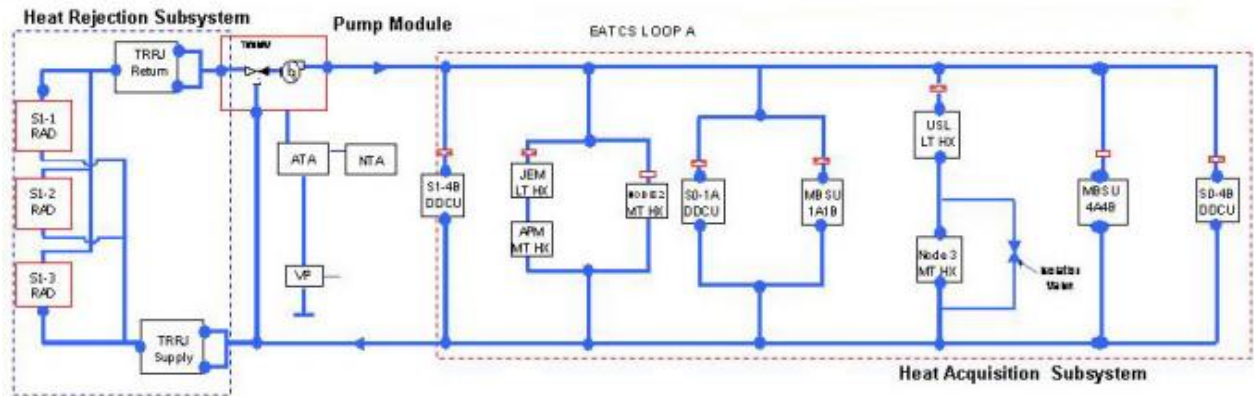
Figura 5. Aleta (Boeing, 2019)



- Rejeição de calor por radiação: A rejeição de calor acontece por meio do SAECT. Esse é composto pelos 2 loops externos de amônia independentes (Loop A e B) que recebem o calor transferido pela água e o transporta para os radiadores externos a estação, responsáveis por irradiar esse calor para o espaço. Juntos, os radiadores do SAECT foram projetados para irradiar até 70000 W de energia térmica. A temperatura da amônia ao longo do SAECT varia entre valores em torno de 280,5 K e 276,9 K (Patel et al., 2001).

O sistema completo de manejo de calor ficou disposto como na Fig. 6.

Figura 6. Sistema de controle térmico da EEI (Boeing, 2019)



1.2. Ciclos Rankine

Em todos os sistemas de produção de energia elétrica há perdas de energia por forma de calor, em aplicações aeroespaciais essa energia é transferida para fora do corpo por meio de radiação térmica. Em aplicações em que o custo energético é responsável por uma grande parte do custo total é comum a reutilização da parcela de energia liberada em forma de calor para ser transformada em outro tipo de energia, esse processo é chamado de cogeração, uma prática comum, como em Al-Rabghi et al. (1992) e Souza et al. (2013).

Quando se trata de missões espaciais, principalmente de missões tripuladas, a fonte de energia é uma das maiores preocupações. Diversos sistemas de suporte a vida precisam de energia elétrica para funcionar, assim como os sistemas de telecomunicações (Simon e Nored, 1987). No programa Apollo, que teve as missões tripuladas de maior duração e distância da Terra que já existiram, a geração de energia elétrica por células de combustível foi utilizada. Contudo, para missões de durações maiores, como para Marte e além, o combustível e o oxidante necessários para o funcionamento dessas células tomariam muito da carga máxima de um veículo, carga que poderia ser utilizada para levar comida ou outros instrumentos importantes.

Como já foi mostrado historicamente, em aplicações aeroespaciais o pré-desenvolvimento de tecnologias é muito importante na fase de desenvolvimento de missões espaciais. Com a existência de diversas propostas paralelas com o mesmo objetivo, um ambiente competitivo de ideias é criado e a probabilidade de que a ideia final seja melhor é maior, várias ideias alternativas e criativas surgem desse processo, como Jones et al. (2013) e McKeathen et al. (2019). Sendo assim, esse trabalho propõe mais um potencial de geração de energia elétrica para missões espaciais tripuladas de longa duração, utilizando de um Ciclo Rankine Orgânico (CRO) para reaproveitamento de calor, ciclo que já é utilizado, como em Dai et al (2008).

O desenvolvimento e instalação de um Gerador de Energia Elétrica com base em um CRO (GEECRO) pode economizar muito espaço e carga paga de um veículo espacial, sendo que ao invés de um combustível e um oxidante, como nas células de combustível, ele utiliza uma quantidade limitada e reutilizável de fluido de trabalho e do calor rejeitado pelo próprio veículo para produzir eletricidade.

A EEI é o ambiente perfeito para a instalação e teste de um aparelho como esse. Caso instalado e testado na EEI, o GEECRO pode ser observado para erros e possíveis melhorias futuras. As primeiras versões desses aparelhos serão grandes e apresentarão erros, como toda nova tecnologia, com o passar das mudanças e evoluções um modelo ideal para missões tripuladas de longa duração pode surgir.

Sendo também baseado em um ciclo Rankine temos que o CRO deve apresentar, fundamentalmente, quatro componentes:

- Evaporador: Um trocador de calor responsável por transmitir calor de uma fonte quente externa para o líquido de trabalho dentro do ciclo, fazendo-o trocar de fase para o seu estado de vapor.

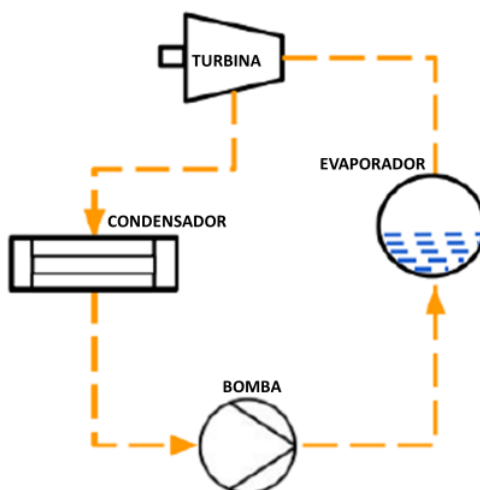
- Dispositivo de expansão termodinâmica: Geralmente uma turbina que, através da expansão do fluido de trabalho do ciclo, desenvolve potência mecânica que pode ser extraída do sistema para alguma aplicação externa.

- Condensador: Um trocador de calor responsável por transmitir calor do fluido de trabalho para uma fonte fria externa, fazendo o fluido trocar de fase para o estado líquido.

- Bomba: Um dispositivo que recebe potência mecânica e transmite energia para o fluido de trabalho continuar seu percurso no ciclo.

Um ciclo Rankine genérico, com todos esses elementos citados acima, está representado na Fig. 7.

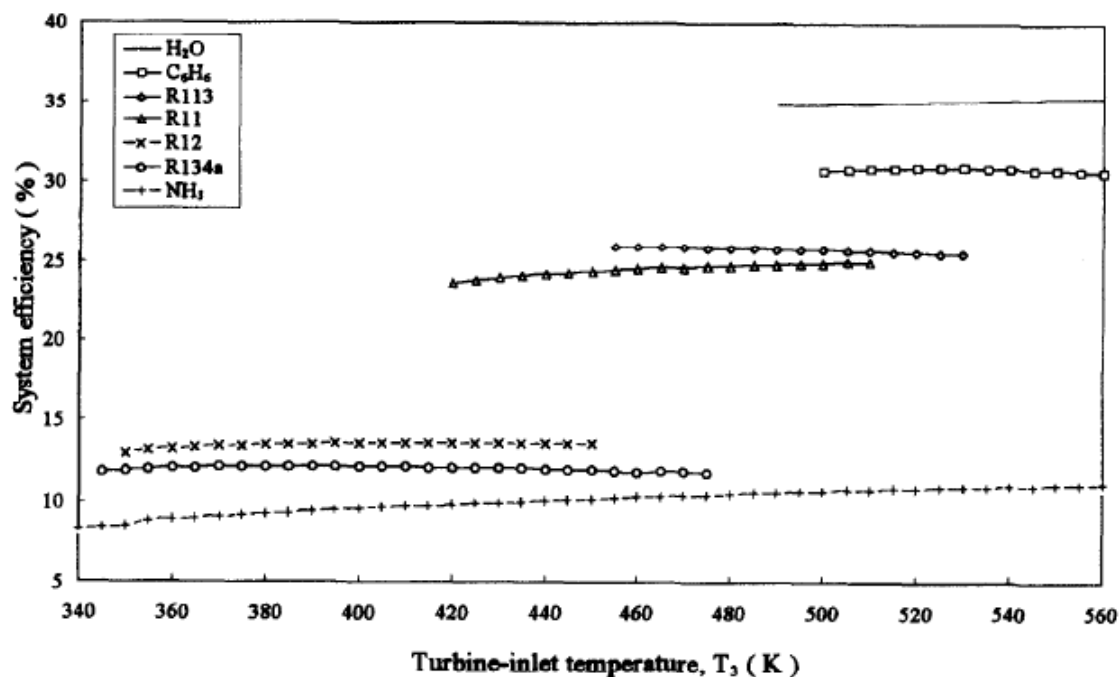
Figura 7. Ciclo Rankine (Luiz e Gallego, 2015)



Em aplicações industriais de reutilização de calor em usinas de produção de energia elétrica, geralmente se usa um ciclo Rankine comum, com água, tendo em vista que essas aplicações geralmente trabalham em temperaturas altas, superiores a 643 K. Contudo, em aplicações com temperaturas mais baixas que 643 K, a utilização de água como fluido de trabalho deixa de ser eficiente, sendo assim, aplicações de cogeração em sistemas de temperaturas baixas geralmente são descartadas pela indústria, pela falta de um método eficiente para tal (Hung et al., 1996).

Desde a década de 1990, foram realizados experimentos com ciclos Rankine utilizando outros fluidos de trabalho, que não água, visando suprir essa carência em temperaturas mais baixas. Esses são os CRO, que utilizam fluidos de trabalho orgânicos, como R11, R12, R134a e R113, que são ideais para faixas de temperaturas de trabalho mais baixas, como mostrado em Hung et al. (1996). Podemos obter a eficiência de transformação de calor em energia elétrica na turbina baseado na temperatura e pressão com as quais o fluido de trabalho adentra na turbina, vemos esses dados de variação em função da temperatura de vários fluidos na Fig. 8.

Figura 8. Eficiência de vários fluidos orgânicos em função da temperatura de entrada na turbina (Hung et al., 1996)

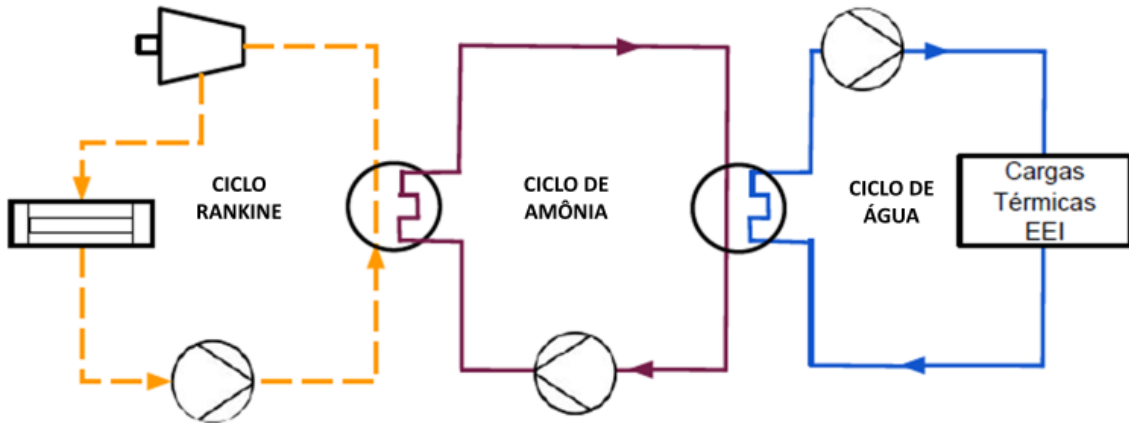


2. METODOLOGIA

Primeiramente foi necessário projetar o layout do sistema como um todo, composto pelo CRO e pelos subsistemas que compõem o condensador e o evaporador. O evaporador é o trocador de calor que transfere energia térmica da amônia

quente do SAECT para o fluido de trabalho interno ao CRO e o condensador ficou definido como um radiador, como os já existentes na EEI, que resfria o fluido de trabalho para voltar ao estado líquido, resultando no seguinte sistema representado na Fig. 9.

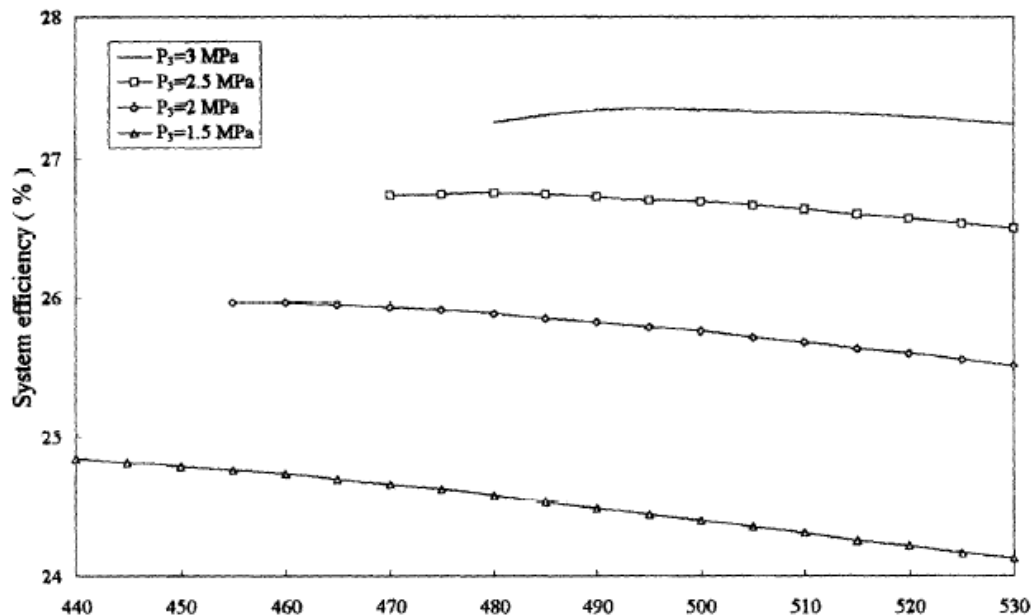
Figura 9. Sistema termodinâmico proposto



Para escolher o fluido de trabalho para o CRO, vemos por Hung et al (1996) que o fator mais influente é a pressão e que pequenas variações de temperatura não mudam muito na eficiência total do sistema. Escolhemos o fluido R113 por apresentar uma alta eficiência e possuir mais trabalhos científicos e dados de funcionamento catalogados que o Benzeno, o fluido orgânico mais eficiente, pelos dados mostrados.

Temos, na Fig. 10, o comportamento do R113 demonstrado com a variação dessas duas propriedades termodinâmicas:

Figura 10. Eficiência do fluido R113 (Hung et al., 1996)



Como calor de entrada do evaporador do ciclo foi utilizado todo o calor rejeitável, por projeto, de 70000 W do SAECT. Por questão de conveniência, a bomba utilizada no sistema foi a mesma já usada nos loops do SAECT, que possui uma pressão nominal de funcionamento de aproximadamente 2,06 Mpa (Boeing, 2019).

Pelo gráfico da Fig. 9, temos que a eficiência do sistema será em torno de 26%, resultando em uma potência útil de 18200 W que é correspondente a 14,67% dos 124000 W de potência instalada dos painéis fotovoltaicos.

3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Na Tab. 1 temos todos os dados da análise energética do sistema proposto.

Tabela 1. Dados do sistema

Fluido de trabalho do CRO	R113
Calor fornecido ao fluido pelo evaporador	70000,00 W
Pressão nominal de trabalho da bomba	2,06 Mpa
Eficiência na turbina	26,00%
Potência elétrica fornecida pela turbina	18200,00 W

Como a temperatura da amônia no SAECT é muito baixa, será necessário diminuir a pressão de trabalho da bomba dentro do CRO para que o fluido de trabalho possa ser evaporado e condensado a cada ciclo. Sendo assim, ainda é previsto uma redução de eficiência total do sistema, já que esta é proporcional à pressão de trabalho.

Ainda é necessário realizar outras considerações para a confirmação do funcionamento desse sistema, como a avaliação das temperaturas de trabalho dos fluidos dentro do evaporador e o transporte desse fluido em órbita, contudo, é visível que existe um alto potencial para cogeração utilizando o calor gerado dentro da estação, que até hoje, é todo descartado para o espaço.

É importante notar que a única eficiência analisada nesse trabalho foi a da turbina, no entanto, existem outras ineficiências quando o sistema como um todo é considerado. Para que esse dispositivo seja construído ainda é preciso realizar a análise da eficiência do trocador de calor do evaporador e do condensador, da bomba e as perdas de carga existentes ao longo da tubulação.

É de extrema importância para o desenvolvimento da exploração espacial tripulada que sistemas como esse sejam mais estudados e aprimorados, tendo em vista que podem resolver problemas térmicos, energéticos e de redução de carga necessária para missões espaciais de longa duração. Por ser um sistema complexo, tanto pelo ponto de vista termodinâmico quanto pelo mecânico, é recomendado a realização de trabalhos de análise detalhada dos aspectos previamente citados.

Com a comprovação de um sistema como esses, através de testes na EEI, será possível desenvolver versões otimizadas para missões espaciais de longa duração, como viagens tripuladas para outros planetas, as quais exigem eficiência energética alta.

4. REFERÊNCIAS

- A. J. Hanford, M. K. Ewert. 1996. *Advanced Active Thermal Control Systems Architecture Study*.
- Al-Rabghi, O.M., Beiruty, M., Akyurt, M., Najjar, Y., Alp, T., 1992. *Recovery and utilization of waste heat*.
- Barja, G.J.A., Carvalho, M.O.M., Veras, C.A.G., 2006. A Cogeração e sua inserção ao sistema elétrico. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica.
- Boeing, *Active Thermal Control System (ACTS) Overview*, 6 Jul. 2019
<https://www.nasa.gov/pdf/473486main_iss_atcs_overview.pdf>.
- Dai, Y., Wang, J., Gao, L., 2008. *Parametric Optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery*. *Energy Conversion and Management*.
- Gilmore, D., 2002. *Spacecraft thermal control handbook*. Norwich, NY: Knovel.
- Hung, T.C., Shal, T.Y., Wang, S.K., 1996. *A Review of Organic Rankine Cycles (ORCs) For the Recovery of Low-Grade Waste Heat*.
- Jones, H.W., Pace, G.S., Fisher, J.W., 2013. *Managing Spacecraft Waste Using the Heat Melt Compactor (HMC)*. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
- Karam, R., 1998. *Satellite Thermal Control for Systems Engineers*. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Kitmacher, G., 2006. *Reference guide to the International Space Station*. Burlington, Ont.: Apogee Books.
- Lienhard, J., Lienhard, J., 2000. *A Heat Transfer Textbook*. Newburyport: Dover Publications.
- Luiz, A., Gallego, A., 2015. Análise Termodinâmica de Sistemas de Geração do tipo Rankine Orgânico acoplados a Concentradores Solares. Projeto de Iniciação científica.
- McKeathen, J.E., Reidy, R.F., Boetcher, S.K.S., Traum, M.J., 2009. *A Cryogenic Rankine Cycle for Space Power Generation*. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
- Patel, V.P., Barido, R., Johnson, B., Ibarra, T., 2001. Development of the International Thermal Control System (ITCS) for International Space Station (ISS).
- Simon, W.E., Nored, D.L., 1987. *Manned Spacecraft Electrical Power System*. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 75, No. 3.
- Souza, M.T., Piva, R.H., Piva, D.H., Montedo, O.R.K., 2013. Reaproveitamento de Calor na Indústria Cerâmica. *Cerâmica Industrial*.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.