

PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO DE UMA TURBINA DE TESLA OPERANDO A AR COMPRIMIDO

Guilherme Moreira Placco, placco@ieav.cta.br¹

Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães, guimarae@ieav.cta.br²

Giannino Ponchio Camillo, gianninocamillo@gmail.com²

¹Faculdade de Tecnologia São Francisco, Avenida Siqueira Campos 1174, Centro, Jacareí, SP, Brasil, 12307-000.

²Instituto de Estudos Avançados, Divisão de Energia Nuclear, Rodovia dos Tamoios km 5.5, Putim, São José dos Campos, SP, Brasil, 12.228-000.

Resumo: *A Divisão de Energia Nuclear (ENU) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) iniciou um projeto denominado TERRA (Tecnologia em Reatores Rápidos Avançados). O projeto visa construir e estudar um Ciclo Brayton Fechado (CBF) focado na aplicação em um reator espacial. Os objetivos principais do estudo são: estabelecer um conceito inicial para as especificações técnicas dos componentes do CBF, e desenvolver um simulador demonstrativo do CBF em condições de operações nominais em estado estacionário. Para a construção de um modelo de testes do CBF, o projeto conta com uma turbina aeronáutica NOELLE 60290. Neste trabalho estuda-se a possibilidade da substituição desta turbina para uma turbina de Tesla. Uma série de experimentos foram desenvolvidos no IEAv operando a turbina de Tesla inicialmente com ar comprimido, avaliando-se parâmetros como: torque, potência, relação de diâmetro dos discos, espaçamento dos orifícios, ângulo de injeção de ar, rotação, viscosidade dinâmica, pressão estática, pressão dinâmica, velocidade de escoamento, rugosidade de material, resistência dos discos. Este trabalho tem por objetivo apresentar alguns resultados parciais deste estudo.*

Palavras-chave: *Turbina de Tesla, Ciclo Brayton, Energia Nuclear*

1. INTRODUÇÃO

O projeto TERRA – TEcnologia de Reatores Rápidos Avançados vem sendo conduzido dentro da Divisão de Energia Nuclear (ENU) do Instituto de Estudos Avançados (IEAV); (Guimarães et AL, 2007). Este projeto tem como objetivo de longo prazo adquirir a capacidade e desenvolver a tecnologia para projetar e construir microrreatores rápidos, para gerar calor e energia elétrica, com a finalidade de aquecer e alimentar eletricamente equipamentos de veículos espaciais. Como opção importante tem-se também a produção de efeito propulsivo. No médio prazo pretende-se estabelecer o conceito de um microrreator rápido para gerar energia elétrica em localidades isoladas e situações inóspitas. Estes objetivos de longo e médio prazo fornecem a orientação geral do projeto. Na parte de objetivos específicos ou de curto prazo, num intervalo de quatro anos, tem-se, entre outros:

1. Desenvolver e construir um circuito térmico a gás, do tipo Brayton, a fim de avaliar a tecnologia de ciclos térmicos para a geração de energia elétrica, extração e rejeição de calor;
2. Criar frentes de pesquisas sobre funcionamentos de diversos equipamentos de sistemas turbina-compressores;
3. Realizar análise computacional para identificar os tipos de combustível nuclear, enriquecimentos e formas geométricas de núcleos de microrreatores rápidos de interesse; e
4. Identificar as necessidades de P&D de um sistema de geração elétrica baseado em um microrreator rápido.

Este artigo está inserido no segundo item dos objetivos específicos do projeto TERRA. O balanço de planta ou ciclo Brayton está sendo no momento projetado em torno de um micro turbo de nome NOELLE 60290, a qual é uma turbina aeronáutica utilizada na forma de uma APU (*Auxiliary Power Unit*). É importante observar que as turbinas utilizadas na aplicação espacial são do tipo impulsiva. Esta observação abre a possibilidade de substituir a turbina aeronáutica por uma turbina Tesla, a qual é unicamente impulsiva. A experiência de trabalhar com a turbina Tesla revela também que a mesma é extremamente robusta, condição ideal para operação isolada por grandes intervalos de tempo no espaço. Este trabalho apresenta os resultados preliminares de caracterização de uma destas turbinas. Esta caracterização está sendo feita inicialmente com a turbina operando de forma aberta.

A Fig. (1) mostra o desenho esquemático de uma turbina de Tesla (Tesla et al, 1913), que consiste em uma série de discos, eixo, rolamentos, invólucro, direcionador de escoamento e área de escape. O projeto de construção da turbina de Tesla em estudo neste trabalho, da definição das peças à sua fabricação, foi integralmente desenvolvido no IEAv.

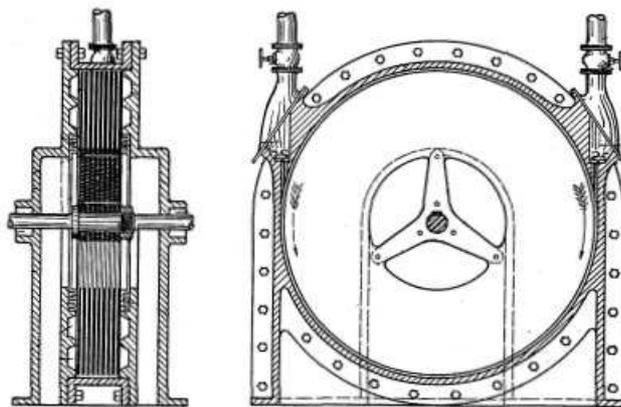


Figura 1. Turbina de Tesla

A turbina de Tesla construída foi submetida a uma série de experimentos, funcionando inicialmente com ar comprimido. Estes experimentos permitiram iniciar uma análise do desempenho da mesma (torque e rotação, por exemplo) com a variação de alguns parâmetros de sua configuração (número de discos, espaço entre discos e alinhamento dos furos). Tal estudo está proporcionando avanços para o programa TERRA uma vez que tal aplicação é inédita.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Uma turbina de tesla consiste em um sistema de discos posicionados paralelamente entre si ao longo de um eixo, um invólucro que envolve estes discos, paredes laterais e arranjos apropriados para entrada e saída do fluido de trabalho. Ao inserir um jato de fluido tangencial ao plano dos discos, é criado um torque no eixo. Este torque pode ser aproveitado, por exemplo, para bombas d'água e alternadores elétricos.

A turbina projetada e construída no IEAv tem como invólucro um anel de aço, no qual foi usinado um furo para permitir a entrada do fluido de trabalho, e como paredes laterais placas de acrílico, que suportam os rolamentos para o eixo, também usinado em aço. Nestas placas, próximo ao suporte do eixo, foram usinados seis furos, para permitir a saída do fluido de trabalho. Os discos utilizados são de discos rígidos (HDs) descartados, cujas dimensões são de 95mm de diâmetro externo, 25mm de diâmetro interno e 0,85mm de espessura. Para permitir o escoamento, os discos contam com oito orifícios de 12mm de diâmetro cada, em sua face, e cujos centros distam 40mm do centro do eixo da turbina.

A Fig. (2) mostra com mais detalhes cada item componente da turbina construída no IEAv.

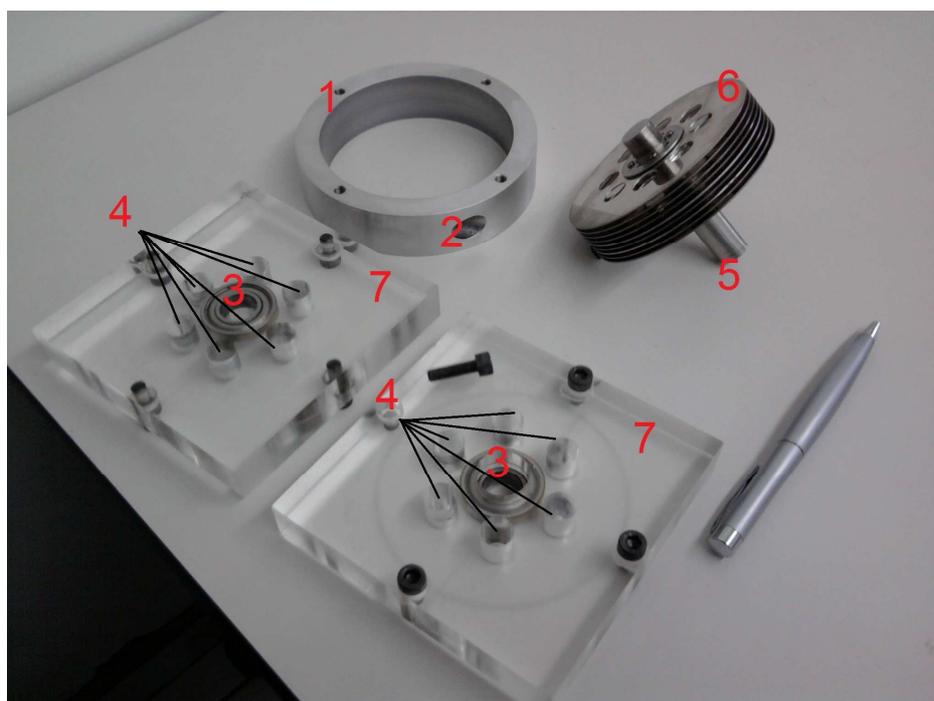


Figura 2. Turbina de Tesla desmontada: 1- Invólucro 2- Entrada do fluido 3- Rolamentos 4- Saídas do fluido 5- Eixo 6- Discos 7- Laterais

O fluido utilizado neste trabalho é o ar, proveniente de uma linha de ar comprimido do laboratório. Uma vez acionado o sistema, nota-se a aceleração da rotação até entrar em regime.

3. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

O objetivo dos experimentos foi avaliar a influência da pressão da linha de ar comprimido de entrada, do número de discos e da defasagem entre os furos dos discos no funcionamento da turbina de Tesla. Para isso, a infra-estrutura do laboratório contou com um medidor de vazão (0-15 L/s), um medidor de temperatura (0-50 °C) da linha de ar comprimido e um regulador de pressão (0-1 MPa). Estes equipamentos são necessários não apenas para variar as condições de entrada, mas também para que as condições de operação em cada teste sejam monitoradas, de modo a minimizar a ação de oscilações da linha de pressão nos resultados. Ainda assim, para garantir condições ideais em cada experimento, seria necessário não apenas um medidor de temperatura, mas também um controle da mesma, além de um sistema de desumidificação do ar, equipamentos cuja instalação não foi possível até o momento.

Para uma melhor base de dados, foram realizados experimentos para verificar a influência da pressão da linha com várias configurações de discos (de 7 a 14 discos) e a influência do número de discos com várias pressões de entrada (de 100 a 600 kPa).

4. RESULTADOS

4.1. Influência do Número de Discos

Um dos parâmetros de variação da configuração do sistema analisado foi a variação do número de discos. Outro fator que foi variado junto com o número de discos foi a distância entre os mesmos, uma vez que se torna inviável, no momento, usinar novos componentes para que se possa ter o controle dos testes. Para se manter a mesma distância entre discos, seria necessário obter eixos e invólucros de tamanhos variáveis para cada configuração de números de discos, tornando assim, viável a variação dos espaçadores entre discos.

Notou-se que o aumento do número de discos reduz a aceleração angular e a velocidade angular máxima. Isto pode ser explicado pelo aumento da massa do sistema e conseqüentemente do momento de inércia. Outro fator é que em função do aumento do número de discos, a distância entre discos foi reduzida, diminuindo assim as correntes de fluxo, porém aumentando a transferência de energia do fluido para o sistema, uma vez que a superfície de contato do fluido com os discos aumenta, cresce também a interação do fluido com os discos. A Fig. 3 mostra um exemplo, para uma pressão de 500kPa, do comportamento da turbina para diversas configurações do sistema variando o número de discos e a distância entre eles, uma vez que foi usado o mesmo eixo e variado os espaçadores entre discos.

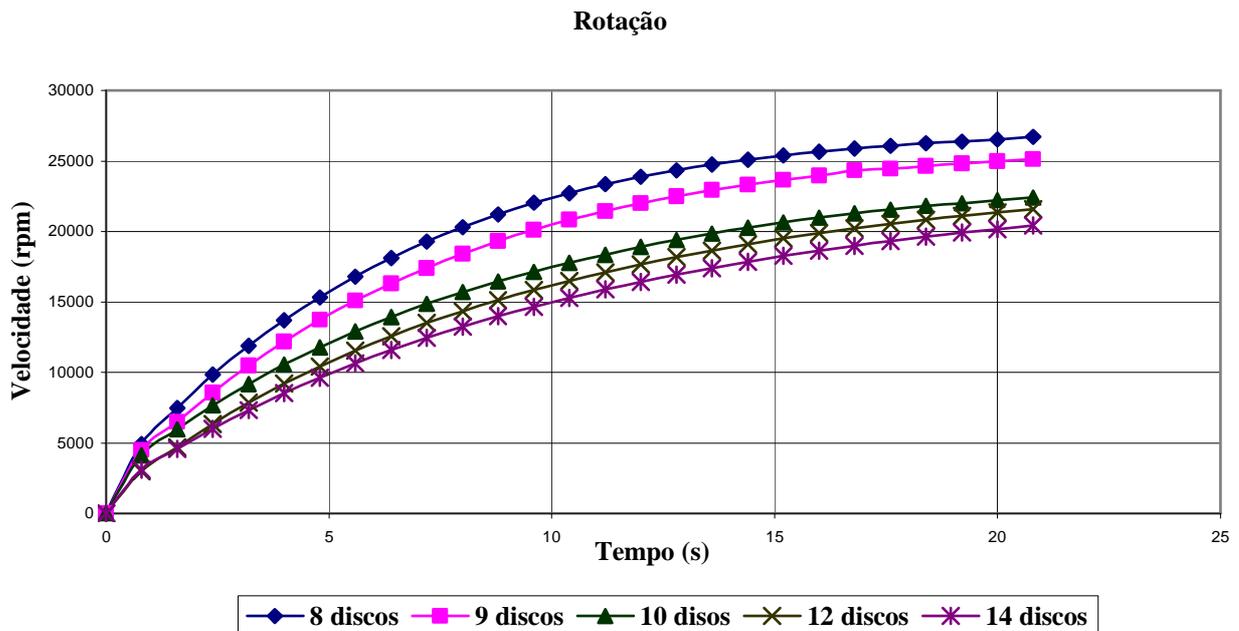


Figura 3. Variação da rotação no tempo. Pressão de 500 kPa.

4.2. Influência da pressão

A metodologia adotada para mensurar a influência da pressão no sistema consistiu em, primeiramente, ajustar a pressão da linha de ar comprimido de entrada para um valor conhecido. Com a válvula acionada foi medido o tempo gasto para o sistema partir do repouso até chegar em regime. O teste foi repetido para diversos valores de pressão.

Com o aumento da pressão de entrada aumenta a velocidade com que o fluido de trabalho entra no sistema, o que, por consequência, aumenta a aceleração angular e velocidade angular máxima para todas as configurações de discos. O comportamento observado foi o mesmo para todas as situações e é apresentado no gráfico da Fig. 4 que mostra o comportamento para um sistema de 8 discos.

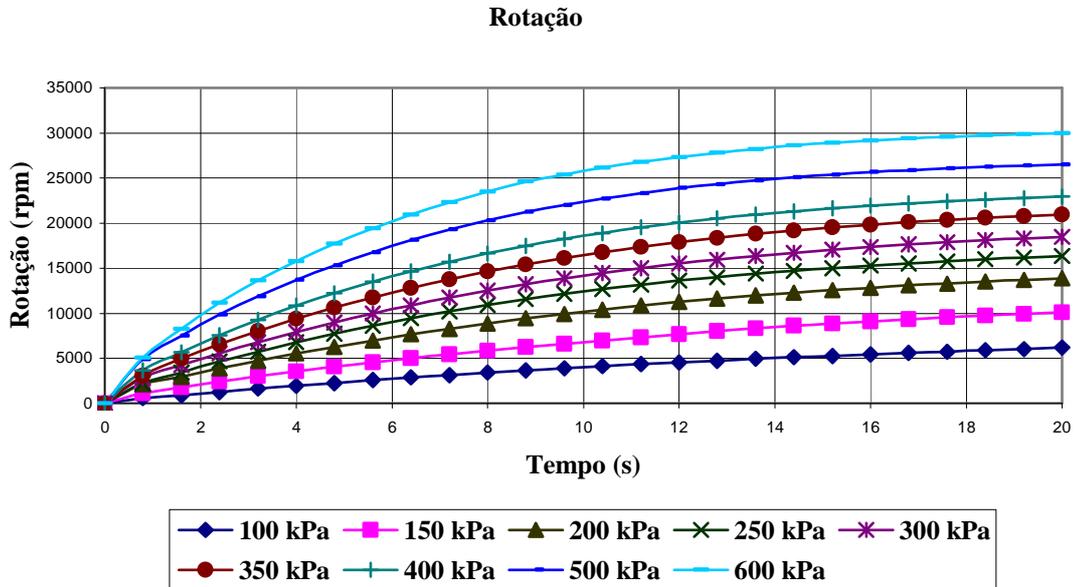


Figura 4. Sistema de 8 discos variando com a pressão

4.3. Influência do alinhamento dos orifícios dos discos

Para analisar se há alteração no comportamento do sistema em função da defasagem ou do alinhamento dos orifícios, foram feitos testes preliminares com a configuração de 9 discos, que foi adotada como controle. Realizou-se o teste de controle para o sistema com os orifícios alinhados entre si. Então os orifícios foram deslocados de forma a apresentar alinhamento com uma reta que faz $+30^\circ$ (positivo) com a normal ao plano dos discos. O mesmo teste foi repetido com uma reta de -30° (negativo). O sistema de defasagem adotou o disco central como referência. Sendo assim, os das laterais tiveram seus ângulos defasados como é mostrado na Fig. (5).



(a)



(b)

Figura 5. (a) Furos alinhados (b) Furos defasados

Observou-se que para os sistemas que se obteve seus orifícios defasados entre si, tiveram um ganho máximo de 12% no caso da defasagem de $+30^\circ$, Fig. (6). Foi observado que ambas as defasagens tiveram resultados melhores que o

sistema com orifícios alinhados. Esse resultado pode ser consequência da interação das linhas de corrente do escoamento com os orifícios.

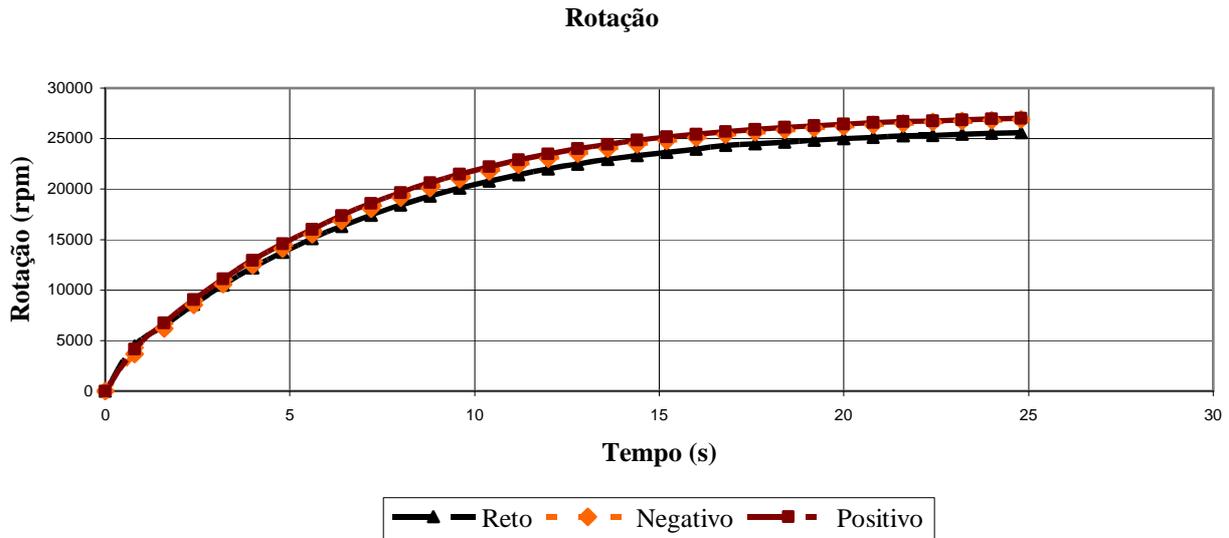


Figura 6. Gráfico de rotação para comparação da defasagem dos orifícios dos discos

4.4. Potências

Após realizados testes, foram feitos levantamentos de variáveis que possibilitaram o cálculo de potência nominal da turbina. Os parâmetros usados para o cálculo da potência mecânica foram rotação, tempo e momento de inércia, e para o cálculo da potência elétrica foi usado a equação básica de potência dissipativa da eletricidade.

Para medir a rotação foi usado um tacômetro digital a laser. Para calcular o momento de inércia foi modelado o sistema das partes rotantes no software CATIA V5R19, que forneceu o valor no sistema internacional (kg.m²).

A Tab. (1) mostra os valores obtidos.

Tabela 1. Valores de momento de inércia para as configurações usadas.

	7 Discos	8 Discos	9 Discos	10 Discos	12 Discos	14 Discos
Momento de inércia (kg.m ²)	1,23E-04	1,39E-04	1,55E-04	1,71E-04	2,03E-04	2,34E-04

4.4.1 Potência mecânica

Para o cálculo de potência mecânica, foi usada a Eq. (1) de potência em função da energia cinética para os corpos rígidos.

$$P = \frac{(f \times \pi)^2}{900 \times t} \times I_0 \quad (1)$$

Onde P é potência em watts, f é rotação em RPM, t é tempo em segundos, e I_0 é o momento de inércia em quilograma metro quadrado.

Para observar o comportamento do ganho de potência da turbina durante os testes, foram feitos vídeos da turbina partindo do repouso até próximo ao seu estado de velocidade constante. O vídeo possibilitava a visualização das leituras do tacômetro, atualizadas a cada 0,8 segundos (taxa de amostragem do aparelho), mostrando em tempo real a evolução da velocidade circular em rotações por minuto (rpm). Foram preenchidas tabelas para vários intervalos de pressão, podendo assim, visualizar graficamente seu comportamento. O gráfico Fig. (7) a seguir exemplifica para um sistema de 9 discos sem defasagem de seus orifícios a variação da potência com a pressão de entrada.

O comportamento anômalo nos dois primeiros segundos acontece devido ao pequeno valor de amostra que o tacômetro recebe, uma vez que o aparelho demora três ciclos para estabilizar a sua leitura.

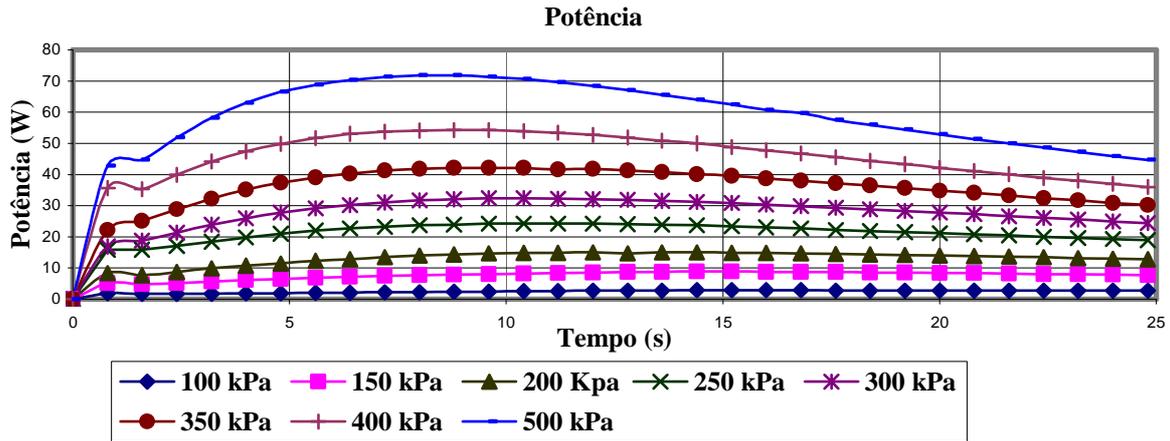


Figura 7. Gráfico de valores de potência para um sistema de 9 discos.

Pela Fig. (8) verifica que a potência máxima cresce com a variação da pressão de 100 a 600 kPa em regime permanente. Foi verificado a potência máxima para cada valor de pressão.

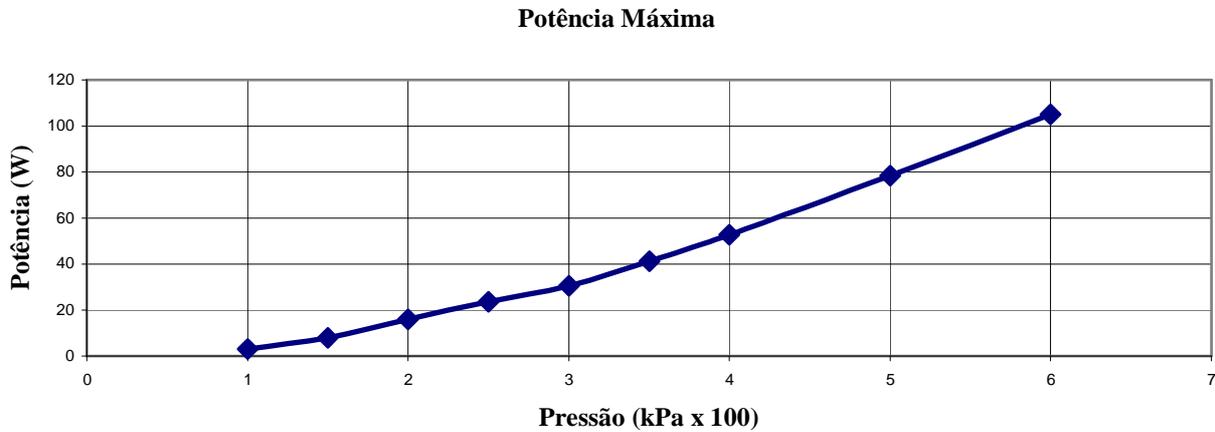


Figura 8. Gráfico de pressão por potência para um sistema de 8 discos

4.4.2 Potência elétrica

Depois de realizados os testes mecânicos com a turbina de Tesla, partiu-se para os cálculos de rendimento do sistema ainda não otimizado. Para isto foi adquirido um alternador de corrente contínua de 27 watts para altas rotações. Para cálculo da potência elétrica foi usada a Eq. (2).

$$P = V \times I \tag{2}$$

Onde V é a tensão e I é a corrente.

Para mensuração de dados, foi utilizado um multímetro HP 34401A que foi conectado a saída do alternador. Para verificar a corrente, o multímetro oferece uma resistência na forma de força eletromotriz de sentido contrário à rotação do alternador. Porém, o mesmo não é verificado para a medição de tensão uma vez que a mesma é influenciada pela frequência do motor, quanto maior o número de revoluções por período de tempo, maior a tensão. Assim, para um mesmo valor de pressão de entrada e configuração de discos, as condições de operação de regime estacionário da turbina são diferentes para o multímetro configurado para leitura de corrente (que oferece resistência considerável) e de tensão (que oferece resistência desprezível).

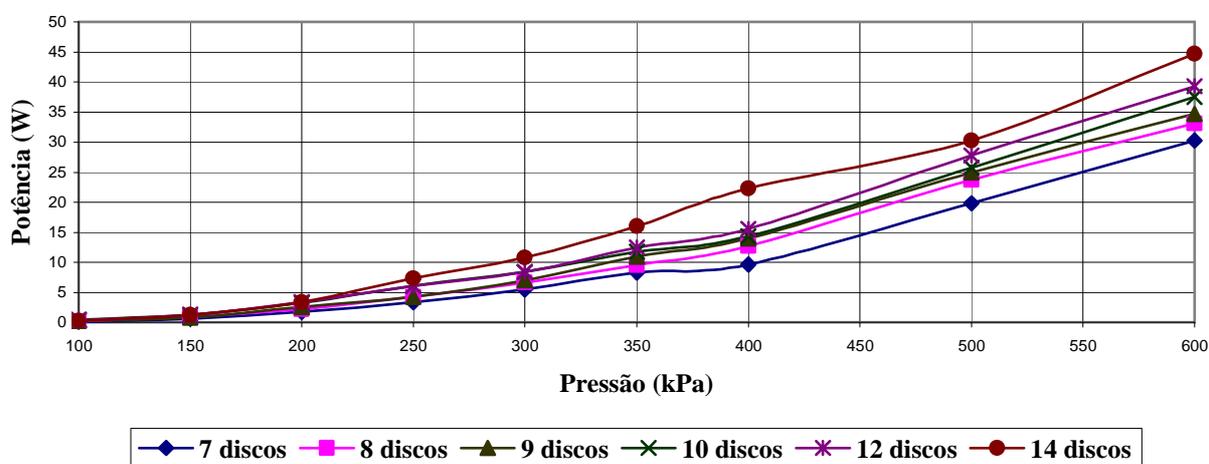
Deste modo, simulando uma carga no eixo, para cada teste foi tomada primeiro a medição de corrente, e medida a rotação estabilizada da turbina. Depois, reiniciando o teste com o multímetro configurado para medir a tensão, a pressão de entrada foi regulada de tal modo que a turbina atingisse a rotação medida no teste anterior, com a medição de corrente. Neste teste, o valor de pressão não é importante, porque o que se busca é medir a tensão correspondente à rotação que fora atingida no teste de medição da corrente. Após a rotação se estabilizar no valor desejado, verifica-se a tensão correspondente. O teste foi realizado para diversos valores de pressão e número de discos. A Tab. (2) mostra os resultados para a pressão de 350 kPa.

Tabela 2. Valores de corrente, tensão, rotação e potência para uma pressão de 350kPa.

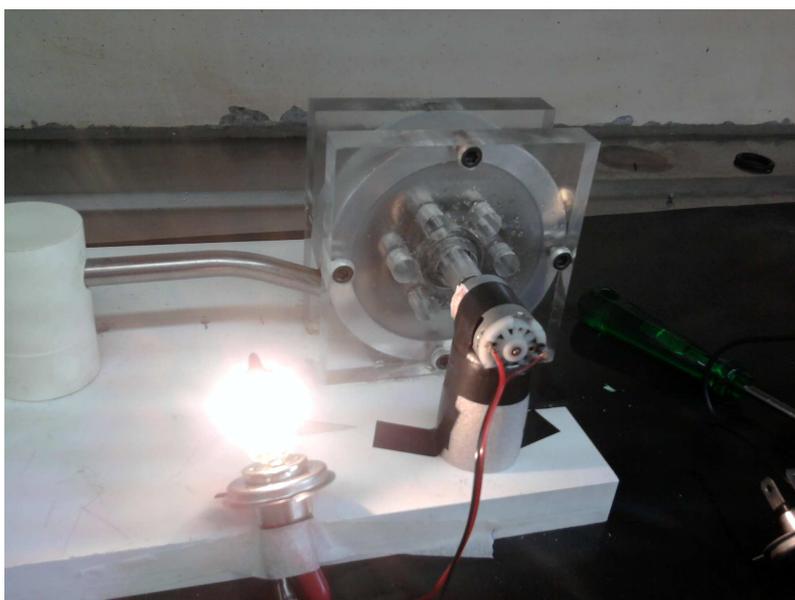
	14 Discos	12 Discos	10 Discos	9 Discos	8 Discos	7 Discos
Corrente (A)	2,80	2,57	2,46	2,36	2,28	2,05
Tensão (V)	5,72	4,86	4,79	4,64	4,19	4,04
Rotação (rpm)	6926	5987	5873	5566	5190	5020
Potência (W)	16,02	12,49	11,78	10,95	9,55	8,28

O sistema foi montado a fim de minimizar as perdas causadas por calor ou por atrito. Desta maneira foi feito um orifício no centro do eixo da turbina, a fim de acoplá-lo ao eixo do alternador, com isto eliminou-se possíveis atritos e aquecimento no sistema. Porém, por se tratar de altas rotações (acima de dez mil rotações por minuto para valores de pressão igual ou superior a 500 kPa), notou-se a ocorrência de pontos de ressonância para diversos valores de rotação que causaram perdas de potência. Essas ressonâncias são perceptíveis no gráfico da Fig. (9) onde, para valores de 7 a 12 discos, houve uma redução na tendência de aumento na potência entre 350 e 400 kPa, e para o sistema de 14 discos o fenômeno ocorreu entre 400 e 500kPa.

Potência Elétrica

**Figura 9. Gráfico de potência por pressão para análise de quantidade de discos**

Na Fig. (10) é possível ver uma demonstração da potência elétrica gerada pelo sistema, sendo conectada uma lâmpada de 55W de potência na saída do alternador.

**Figura 10. Lâmpada incandescente de 55W.**

4.4.3 Comparação entre potências

Com os resultados obtidos é possível calcular a eficiência para a turbina de Tesla ensaiada, de acordo com a Eq. (3).

$$\eta = \frac{P_{elétrica}}{P_{mecânica}} \quad (3)$$

Para analisar os valores de eficiência, é importante destacar que as medidas de potência mecânica foram feitas sem o alternador acoplado no sistema, ou seja, com o eixo livre.

A Fig. (11) mostra que, para o sistema de 8 discos, a eficiência cresce com o aumento da pressão. O aumento de eficiência é decorrente do fato de que as perdas se tornam menos determinantes para valores maiores de pressão. Outro fator que influencia no comportamento da eficiência do sistema é o fenômeno de entupimento do bocal injetor. O entupimento é um termo usado em mecânica dos fluidos (Fox et al, 2001) para identificar um fenômeno que ocorre quando a velocidade do fluido no bocal é igual à velocidade do som no fluido. A relação de pressões necessária para que o entupimento ocorra é descrita pela Eq. (4).

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (4)$$

Onde p é a pressão atmosférica, p_0 é a pressão da linha de ar comprimido e γ é a razão de calor específico do fluido. Para o ar essa equação resulta em 0.528, ou seja, para qualquer valor de pressão da linha acima de 192.5 kPa, o sistema pode ser considerado entupido. O aumento da eficiência do sistema é em razão do fluxo mássico aumentar (consequência do aumento da densidade do ar na linha). Nota-se que para variação de 100 a 200 kPa, onde o sistema ainda não está entupido, os valores de eficiência são baixos em relação a outros valores de pressão.

As oscilações da curva surgem em função de pontos de estagnação, que fazem com que o sistema tenha comportamento variável ao longo do experimento, porém não afetam significativamente os resultados.

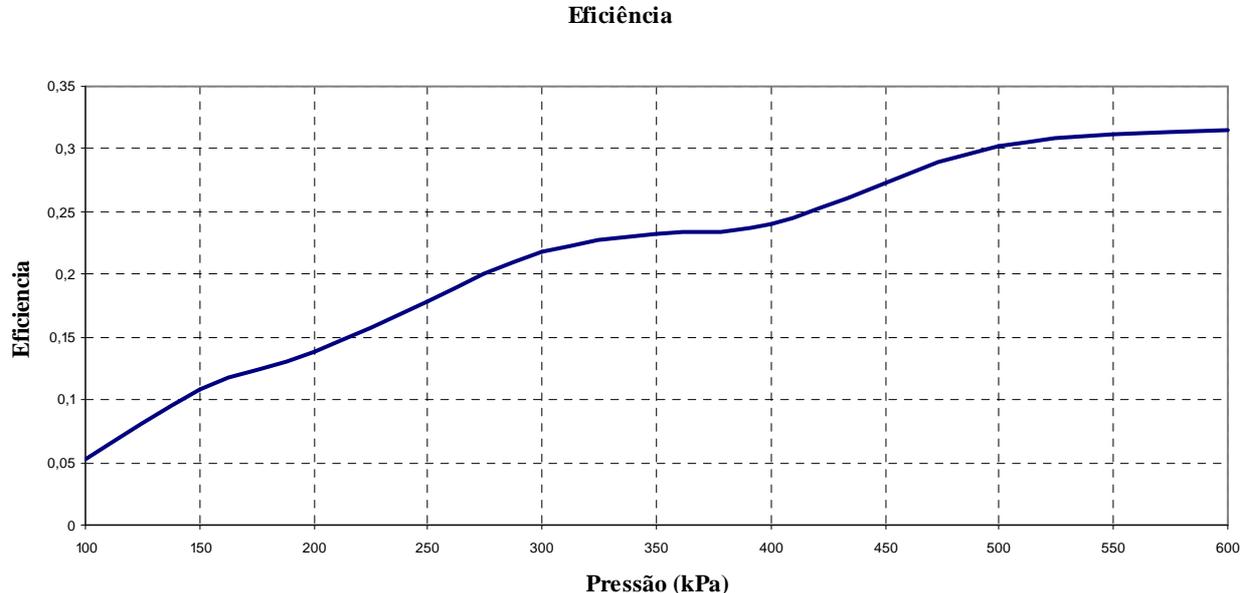


Figura 11. Gráfico de eficiência

A Fig. (12) mostra as curvas de potência elétrica e potência mecânica como função da pressão, para um sistema de nove discos.

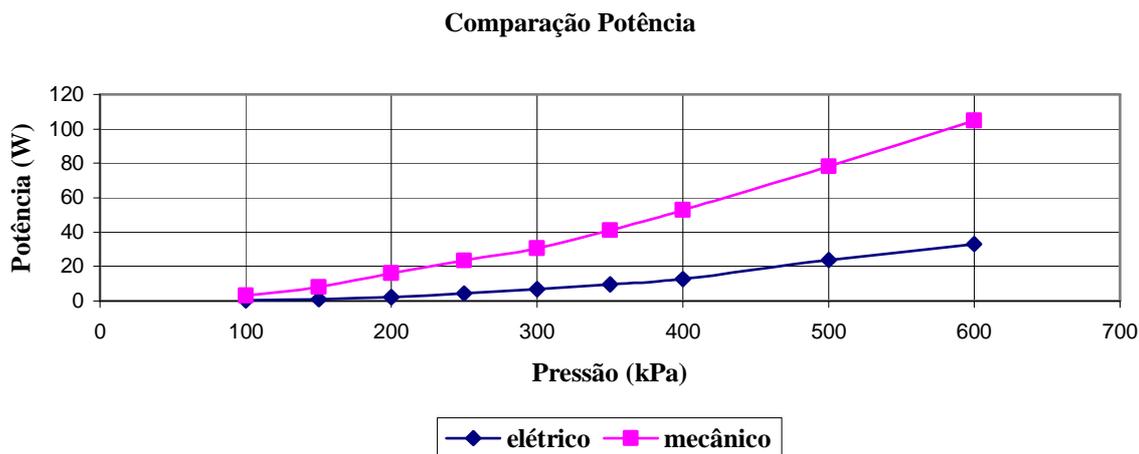


Figura 12. Comparação entre potência mecânica e potência elétrica.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentado os resultados preliminares do funcionamento de uma turbina de Tesla operando com ar comprimido. Esta turbina foi projetada e construída no IEAv.

Foram analisados parâmetros de funcionamento com diversas configurações de discos e valores de pressão do ar comprimido. As configurações de discos envolvem de 7 a 14 discos. No caso sempre mantém-se fixa a distância entre o primeiro e o último disco, reduzindo-se na verdade a distância entre os discos. Os valores de pressão do ar comprimido variam de 100 a 600 kPa.

Observa-se que a partir de 192.5 kPa a vazão é considerada entupida. No entanto, admite-se que as condições geométricas do bocal de saída não eram ideais. Será projetado e construído um novo bocal em aço para futuros ensaios.

A curva de eficiência indica que as maiores eficiências são obtidas para as maiores pressões. Acredita-se que as oscilações desta curva surgem em função de pontos de estagnação, que fazem com que o sistema tenha comportamento variável ao longo do experimento, porém não afetam significativamente os resultados. É importante lembrar que apesar deste ser um bom resultado em um ciclo fechado a pressão de operação média será dada pelo aumento de volume do fluido devido a temperatura e a produção de vazão por um compressor, este fato impõe limites ao valor máximo que a pressão de operação média pode atingir.

Apesar de ser um arranjo experimental modesto, a produção de potência elétrica na forma de luz é bastante impressionante. Este fato é também estimulante para o contínuo desenvolvimento desta linha de investigação e para futuras aplicações espaciais.

A ressonância e conseqüente perda de potência observada para rotações acima dez mil RPM ocorrem para pressões iguais ou superiores a 500 kPa. Como estes resultados são preliminares, preocupou-se mais com fazer funcionar o sistema do que com um perfeito alinhamento do eixo. Este tipo de imperfeição será corrigido em experimentos futuros.

A defasagem de 30° entre os orifícios dos discos, tanto positiva como negativa, resulta num ganho de potência de até 12%. Foi observado que ambas as defasagens tiveram resultados melhores que o sistema com orifícios alinhados. Acredita-se que esse resultado é conseqüência da interação das linhas de corrente do escoamento nos orifícios. Isto será motivo de uma investigação por modelagem CFD – Computational Fluid Dynamics – que se trata de um software de modelagem em mecânica dos fluidos.

O aumento do número de discos ocorre com a redução da distância entre eles, de forma a manter constante a distância do primeiro ao último disco. Isto é feito para que o jato de ar possa ser distribuído para todos os discos, uma vez que é o jato de ar que transfere momentum para os discos. Observou-se que o aumento do número de discos reduz a aceleração angular e a velocidade angular máxima. Isto pode ser explicado pelo aumento da massa do sistema e conseqüentemente do momento de inércia. Outro fator é que em função do aumento do número de discos, a distância entre discos foi reduzida, diminuindo assim a velocidade máxima do perfil de velocidades, porém aumentando a transferência de energia do fluido para o sistema, uma vez que a superfície de contato do fluido com os discos aumenta, sendo que o efeito líquido é o aumento de potência.

Como continuidade desta análise sobre a turbina de Tesla, será construído um modelo em “*Computational Fluid Dynamics*” (CFD) da interação entre as linhas de corrente do escoamento e o alinhamento dos furos, fenômeno que foi observado experimentalmente neste trabalho. Será também analisado o comportamento da turbina operando com fontes de calor em ciclos fechados em diversas configurações de temperatura e pressão. Com isso, busca-se analisar eficiência e viabilidade de geração de eletricidade em aplicações espaciais, tendo como fonte de calor microrreatores nucleares.

6. Referências

- Guimarães, L.N.F., Nascimento, J.A., Borges, E.M., Caldeira, A.D. and Dias, A.F., 2007, “Atividades da ENU na área de tecnologia nuclear avançada: previsão de recursos necessários para a primeira fase do programa TERRA”, Institutional Report, IEAv-ENU/012/2007, São José dos Campos, SP, Brasil.
- Tesla, N., “Turbine” Estados Unidos Patente nº. 1061206, 6 Maio, 1913.
- Fox, R.W., McDonald, A.T. “Introdução à Mecânica dos Fluidos”, 5ª Ed. Editora LTC. 2001, Rio de Janeiro.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no trabalho.

***Abstract:** The Nuclear Energy Division (ENU) from the Institute for Advanced Studies (IEAv) is conducting the project named TERRA which is a Portuguese (Tecnologia em Reatores Rápidos Avançados) acronym for advanced fast reactor technology. In its first four year phase, one of its main objectives is to build and operate a Closed Brayton Cycle Loop (CBCL) for a space reactor application. It is intended to establish a concept for the CBCL components and to reproduce the CBCL steady state nominal operation conditions. At this moment, the micro turbo being considered on the design is the NOELLE 60290. In this work a novel approach is considered, the substitution of the NOELLE 60290 for a Tesla turbine. In order to do that a series of experiments must be performed in order to guarantee that the substitution is feasible. The Tesla turbine investigated operates with compressed air. The parameters being measured are: torque, power, disk diameter ratio, orifice spacing, air injection angle, rotation, dynamic viscosity, static and dynamic pressure, flow velocity among others. At this moment, only initial partial results are presented.*