

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Modelamento de uma Turbina Tesla com Avaliação da Sensibilidade dos Principais Parâmetros
de Desempenho

por

Markus Vinícius Bonzanini

Monografia apresentada ao Departamento
de Engenharia Mecânica da Escola de
Engenharia da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como parte dos requisitos
para obtenção do diploma de Engenheiro
Mecânico.

Porto Alegre, dezembro 2012.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

Modelamento de uma Turbina Tesla com Avaliação da Sensibilidade dos Principais Parâmetros
de Desempenho

por

Markus Vinícius Bonzanini

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Cristiano Frandalozo Maidana

Prof. Leticia Jenisch Rodrigues

Prof. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 18 de dezembro de 2012

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, à minha família pela base educacional, compreensão, pelo suporte emocional e financeiro durante esses seis anos de curso.

Agradeço, também, meu orientador Paulo Schneider pelo grande suporte e paciência durante esse período.

Aos meus queridos colegas, especialmente ao George Porto Haeffner pelos 7 anos de amizade que iniciaram antes do começo do curso.

A todos, muito obrigado.

BONZANINI, M. V. **Modelamento de uma Turbina Tesla com Avaliação da Sensibilidade dos Principais Parâmetros de Desempenho**. 2012. 14 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

O presente trabalho consiste no modelamento de uma turbina Tesla com aplicação para um determinado fluido de trabalho, operando em determinadas condições. O fluido de trabalho é o ar seco. O objetivo do trabalho é modelar uma turbina tesla utilizando um modelo matemático obtido na literatura a fim de avaliar a sensibilidade dos parâmetros de desempenho, potência e eficiência exergética. Pode-se concluir que o escoamento turbulento no interior da turbina possui vantagem, pois a potência e a eficiência foram maiores em comparação ao regime laminar. A maior eficiência no regime laminar foi 0,2% e no regime turbulento de operação, 17,5%.

PALAVRAS-CHAVE: Turbina Tesla, Modelamento de Equipamentos, Sensibilidade de Parâmetros de Desempenho

BONZANINI, M. V. **Modeling of Tesla Turbine with Sensitivity Assessment of Main Performance Parameters**. 2012. 14 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

This work consists in modeling a Tesla turbine with applications for a specific working fluid, operating in under conditions. The working fluid is dry air. The work goal is modeling the turbomachine using a mathematical model obtained in the literature in order to assess the sensitive of performance parameters, power and exergetic efficiency. It can be concluded that the turbulent flow is better than the laminar flow, because the power on the shaft and the efficiency were higher. The highest efficiency in laminar flow was 0,2% and in turbulent flow was 17,5%.

KEYWORDS: Tesla Turbine, Equipments Modeling, Performance Parameters Sensibility

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. TURBINA TESLA	2
3.1 Princípio de Funcionamento	3
3.2 Fundamentação Teórica	5
4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	8
4.1 Metodologia	9
5. RESULTADOS	10
6. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14

1. INTRODUÇÃO

Turbinas Tesla são turbomáquinas que convertem a entalpia do fluido de trabalho em trabalho de eixo. Embora tenham propósito semelhante às turbinas a gás, seus mecanismos de conversão de energia são significativamente diferentes. Nas turbinas a gás, o fluido de trabalho é expandido em conjuntos de rotores e estatores que produzem torque decorrente de uma sustentação aerodinâmica, enquanto que no modelo de Tesla essa conversão se dá devido às forças de arrasto estabelecidas na interface do fluido com os discos do rotor (EMRAN, 2001).

A turbina Tesla é conhecida como “Turbina de Discos” ou “Turbina sem Lâminas” devido à montagem do rotor em discos. Ela foi patenteada por Nikola Tesla em 1913.

Uma forte motivação para o uso da turbina Tesla deve-se aos benefícios técnicos de operação em baixa velocidade de rotação, sendo capaz o acoplamento de um gerador elétrico sem utilizar engrenagens de redução (CAIRNS, 2003). Ela não apresenta problemas de cavitação, exhibe longa vida útil, sendo um equipamento bastante robusto, com baixo nível de exigência para realizar manutenção. Além disso, seu funcionamento é silencioso, sendo viável economicamente utilizá-la na micro geração de energia elétrica na ordem de 100 kW (BATISTA, 2009). Embora exiba baixa eficiência de conversão, se comparada às turbinas convencionais, a turbina Tesla aponta ser uma alternativa interessante para a recuperação de correntes com baixa disponibilidade termodinâmica ou com elevado potencial de risco operacional, como fluidos corrosivos, abrasivos, e outros. Nesse contexto, há estudos em desenvolvimento para a aplicação dessa turbina em sistemas de geração de energia elétrica para mais de 100 kW, utilizando discos modificados, através da utilização da queima de biomassa ou de gases provindos de caldeiras ou fornos a fim de gerar vapor saturado, o qual será utilizado como fluido de trabalho da turbina (BATISTA, 2009).

O objetivo do presente trabalho é de realizar o modelamento de uma turbina Tesla que permita o estudo de sensibilidade de seus principais parâmetros de operação, tais como potência e eficiência geradas pela turbomáquina.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tesla (1913) afirmou que o objetivo da invenção do compressor e da turbina formados por finos discos paralelos, montados sobre um eixo, acoplados a um invólucro cilíndrico era superar as deficiências da utilização de máquinas que possuíam pás em seu rotor, as quais perdiam muita energia devido ao impacto do fluido nesses componentes. Segundo Tesla, havia duas propriedades muito importantes do fluido, que eram a adesividade e a viscosidade. Dessa forma, ele desenvolveu duas máquinas que transformavam energia mecânica do fluido em potência, pelo princípio de aderência do fluido aos discos. Para um observador externo, o fluido no interior desses equipamentos realizava uma trajetória espiral até a saída pela descarga.

Rice (1965) afirmou que o modelo da turbina Tesla é distinto em relação às outras turbinas, pois o rotor é composto por um plano paralelo de finos discos rotativos, espaçados ao longo do eixo. O fluxo de fluido entre os discos resulta em geração de torque no eixo e potência. Com o decorrer dos anos, foram conduzidos diversos estudos sobre a turbina a fim de deduzir os parâmetros de desempenho e a eficiência dessa turbomáquina. Tais estudos foram de simulação, analíticos, experimentais e consideraram o tamanho e velocidade dos discos tão bem como as características do fluido de trabalho utilizado. O escoamento no rotor pode ser de natureza laminar ou turbulenta com vantagens e desvantagens para ambos os regimes. É necessário distinguir cuidadosamente qual o tipo de escoamento considerado para utilizar as correlações corretas no cálculo dos parâmetros de desempenho.

Garret (1982) construiu e testou um protótipo de turbina Tesla utilizando ar como fluido de trabalho, variando as pressões de entrada de 137,8 kPa à 689,4 kPa e velocidades de rotação dos discos de 10000 RPM a 40000 RPM. O pico de eficiência foi de 22,5% com a pressão de 675,6 kPa para a rotação de 40000 RPM, e a máxima eficiência teórica é de 50%.

A eficiência aumenta consideravelmente com a velocidade angular dos discos e com a pressão interna em toda a gama das condições utilizadas.

Ladino (2004) realizou uma simulação e um teste experimental de uma turbina Tesla e afirmou que não foi possível medir o perfil de velocidades entre os discos durante o experimento, apenas a pressão estática devido ao pequeno espaçamento entre os discos. Os resultados da simulação mostraram que as turbomáquinas de discos são viáveis economicamente no ramo da engenharia, entretanto, elas possuem baixa eficiência em ambos os regimes de escoamento, tanto o laminar quanto o turbulento. A eficiência é menor para o regime laminar, sendo a diferença entre eles bastante significativa. Além disso, a simulação mostrou que o espaçamento entre os discos e o resultado do modelo simulado em 3D apontou que a eficiência não é tão alta como foi sugerido por testes experimentais já realizados por outros autores. A turbina Tesla de discos é viável para uma grande variedade de geração de potência quando as turbinas convencionais de pás não possuem alta eficiência ou quando o fluido de trabalho possui partículas, contaminantes e alta viscosidade.

Os equipamentos desenvolvidos por Nikola Tesla são especiais para casos compactos de geração de energia elétrica em locais isolados. Com movimento rotativo de trabalho, pode ser notado que tais máquinas podem ser utilizadas em um espectro de trabalho muito amplo, não utilizando somente combustíveis, como também fluidos em geral. Esses equipamentos podem ser utilizados como motores rotativos, máquinas com alta velocidade de perfuração, dentre outras aplicações (COUTO, 2006)

Lampart (2009) testou a turbina Tesla em uma usina de co-geração de micro potência, com capacidade de 20 kW, operando em ciclo Rankine. O resultado das investigações dos testes foi positivo uma vez que o equacionamento da eficiência proposto mostra que ela pode ser competitiva nessa utilização, por ser mais viável economicamente, em relação às tradicionais turbinas de pás.

Lampart (2011) realizou simulações de um modelo de turbina Tesla e concluiu que sua eficiência depende de diversos parâmetros, tais como pressão interna de trabalho e temperatura do fluido, rotação do rotor, bem como o número, diâmetro e espaçamento entre os discos. Esses parâmetros, uma vez alterados, podem alterar a eficiência da turbomáquina. Além disso, deve ser contabilizado o número de bocais de alimentação da turbina.

Guha (2012) observou que o torque líquido obtido através do eixo da turbina Tesla é dependente do arrasto viscoso do fluido nas paredes dos discos da turbina. Esse torque está em função do gradiente de velocidade tangencial dos discos. Alterando a tensão de cisalhamento viscosa do fluido, podem-se alcançar bons resultados de torque e potência na turbina. Isso pode ser realizado utilizando valores otimizados nas dimensões do equipamento e avaliar as variáveis do fluxo de alimentação, evitando variações de vazão. Devem ser avaliados os efeitos de rugosidade na superfície dos discos a fim de aumentar o desempenho da turbina de discos. Outro item importante para o desempenho do equipamento é o bocal de admissão, uma vez que nele ocorrem perdas que diminuem a eficiência. Em virtude disso, ele deve ser avaliado e dimensionado corretamente.

Observa-se que há diversos estudos realizados sobre a turbina Tesla tanto no ramo da simulação como no experimental para a avaliação dos diferentes regimes de operação. Dessa forma, mostra-se que o regime turbulento de operação possui vantagem, pois potência e eficiência são superiores em comparação ao regime laminar.

3. TURBINA TESLA

Nikola Tesla, mais conhecido por ter desenvolvido a bobina elétrica e o motor à indução, patenteou em 1913 na Inglaterra um compressor e um motor que utilizavam discos rotativos acoplados a um eixo. Ele afirmou ser possível a construção de máquinas muito pequenas, entretanto poderosas utilizando o princípio dos discos rotativos (CAIRNS, 2003).

As máquinas projetadas eram similares, possuindo uma série de discos finos montados sobre um eixo, sendo separados por espaçadores. Esses componentes foram montados em

uma caixa, designada de estator, que forma um rotor. Uma carcaça em formato de tubo com tampa nas extremidades tem como objetivo isolar o ambiente interno do externo, condicionando os discos em seu interior, sem ter contato com os mesmos. Os discos giram por meio de uma admissão tangencial de um fluido de trabalho, por um bocal de admissão, conforme visualizado na Figura 1. O fluido passa por entre os discos e sai pelas aberturas próximas ao eixo, promovendo, dessa forma, o movimento de rotação dos discos.

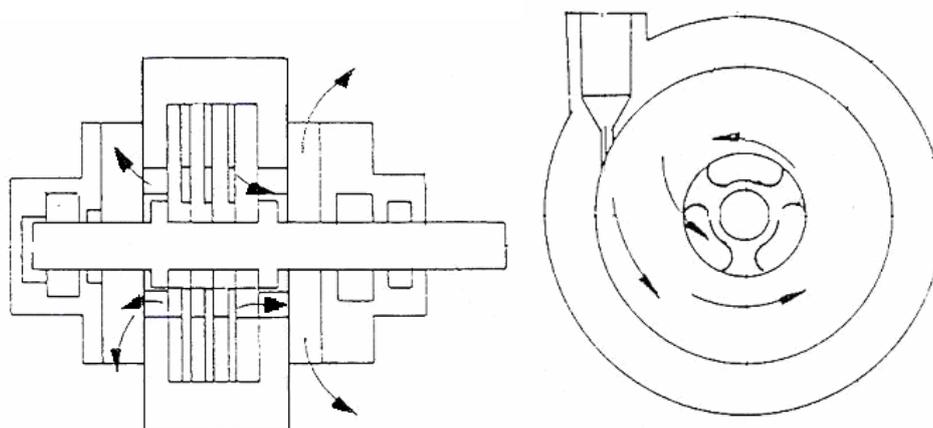


Figura 1: Desenho esquemático funcionamento de uma turbina Tesla, apresentando disco e rotor. (CAIRNS, 2003)

A diferença entre o compressor e o motor desenvolvidos por Tesla está no estator, pois o primeiro tem a forma espiral e o do segundo possui perfil circular.

A maior máquina construída foi de 500 kW de potência, movida a vapor com pressão de 557kPa com 60 discos de 1,5m de diâmetro e rotação de 3.600 rpm, feita pela empresa Allis Chalmers com acordo de trabalho de Tesla (CAIRNS, 2003). Por se tratar de uma máquina simples, sem um rotor multiestágios, operando em um circuito sem condensador, a eficiência não pode ser explorada completamente, no entanto os resultados foram satisfatórios. A intenção de Tesla era a instalação de um rotor multiestágios e um condensador a fim de extrair eficiências mais elevadas do sistema. Após testes realizados na turbina, observou-se o alongamento radial dos discos de aço sob ação da força centrífuga. Esse problema foi caso de crítica dos engenheiros da empresa contratada. Na época, 1914, devido ao estado de desenvolvimento das técnicas de usinagem e dos métodos siderúrgicos, não havia materiais com boa resistência mecânica para a utilização em altas temperaturas e elevadas velocidades de rotação.

3.1 Princípio de Funcionamento

A turbina Tesla consiste em um conjunto de finos discos dispostos muito próximos uns aos outros, sendo separados por espaçadores, montados em um eixo. Esses componentes formam o rotor da turbina. O rotor é acoplado ao invólucro cilíndrico, que forma o estator. As extremidades do estator são fechadas por tampas e nelas se encontram os rolamentos que sustentam o eixo da máquina. Bem no centro dos discos, próximo ao eixo, há furos que permitem o escape do fluido, ou seja, é o local de recalque da turbina. Uma tubulação é disposta tangencialmente na borda da máquina alimentando-a, através do bocal de admissão com fluido de trabalho, que passa entre os discos, ocasionando o movimento de rotação dos mesmos e sai pelas aberturas de exaustão conforme mostra a Figura 2.

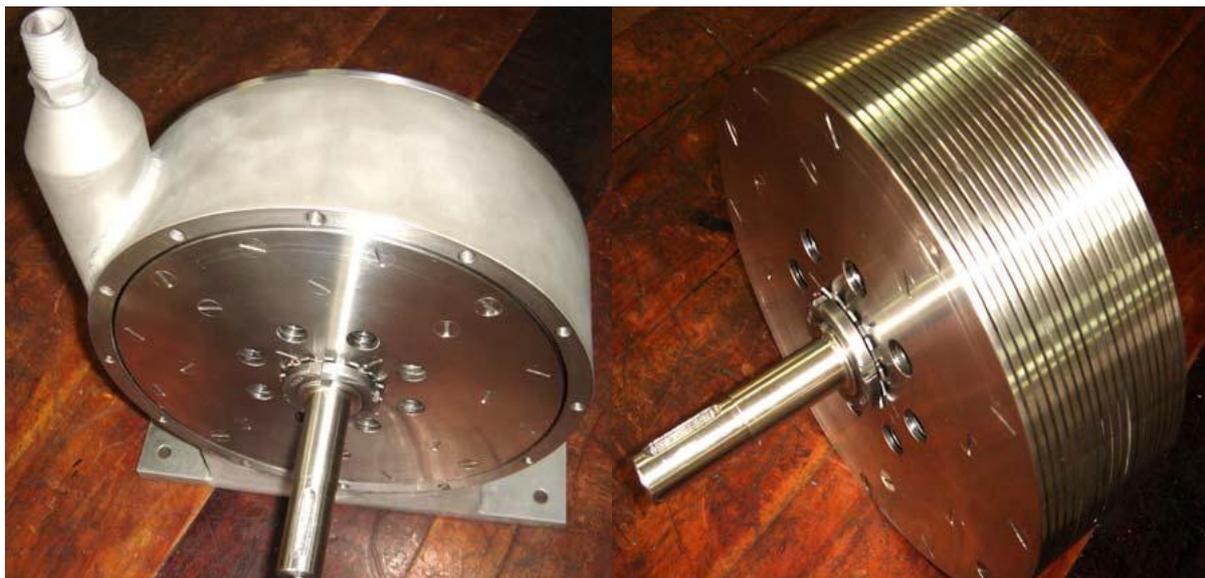


Figura 2: Turbina Tesla com eixo, discos, rotor e carcaça com bocal de admissão (BATISTA, 2009)

A Figura 3 mostra o movimento espiral que o fluido realiza quando entra na turbina. Em uma máquina real, esse movimento é repetido diversas vezes até o fluido sair pelas aberturas de descarga.

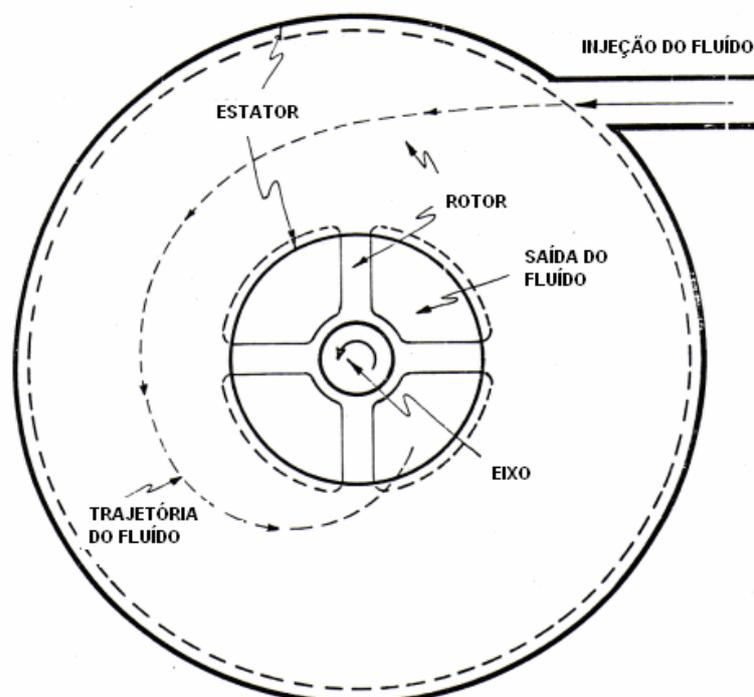


Figura 3: Movimento espiral realizado pelo fluido no interior de uma turbina Tesla. (Adaptado de CAIRNS, 2003)

A aderência do fluido à parede do disco é a característica fundamental da turbina Tesla. Esse efeito é dado em função da camada limite do fluido.

O disco tem a tendência de adquirir a velocidade do fluido que está escoando sobre ele. Caso esse fluido seja injetado tangencialmente sobre a superfície do disco, a componente

tangencial do vetor velocidade é zero para o sistema de referência fixo na superfície do disco, movimentando-se com ele. Dessa forma, a única componente da velocidade avaliada nesse sistema que influencia o escoamento do fluido é a componente da velocidade em direção ao centro do disco, que empurra o fluido em direção às saídas de recalque, que estão próximas ao centro do disco. Para um observador externo, o fluido descreve uma trajetória espiral sobre a superfície do disco.

Deve-se observar que, quando a velocidade da extremidade do disco torna-se igual à velocidade do fluido injetado tangencialmente, a velocidade relativa entre elas tende a zero. Em virtude disso, não há forças do fluido sobre o disco e não há realização de trabalho ou potência sobre o eixo da turbina.

É possível alterar o projeto do rotor, relatado por Batista (2009), com a introdução de ressaltos nos discos a fim de aumentar o torque gerado pelo equipamento. A ideia de modificar os discos lisos da turbina Tesla para obter maior torque consiste em juntar as forças de cisalhamento viscoso da camada limite com as forças resultantes da pressão exercida pelo fluido sobre a área de ressaltos colocados sobre os discos. Isso foi feito restringindo a trajetória espiral do fluido na turbina, forçando-o para a saída do escoamento por meio de um obstáculo com geometria similar às pás da roda Pelton, conforme mostrado na Figura 4.

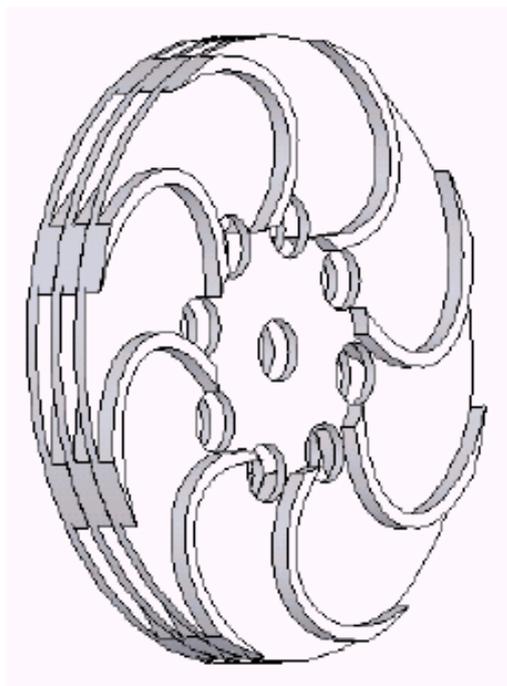


Figura 4: Discos modificados de uma turbina Tesla. (BATISTA, 2009)

Segundo Batista (2009), o torque, a potência e o rendimento de uma turbina Tesla com os discos modificados são maiores em comparação a um modelo com os discos originais.

3.2 Fundamentação Teórica

O equacionamento utilizado nesse trabalho foi adaptado de Batista (2009).

Para o cálculo da temperatura, da pressão e da massa específica no bocal da turbina, será considerado escoamento isentrópico.

O cálculo da temperatura do bocal de entrada da turbina T_b [K] é dado por:

$$T_b = \frac{T_0}{1 + \left[\frac{k-1}{2} \right] Ma^2} \quad (3.1)$$

Onde T_0 é a temperatura do fluido antes de entrar no bocal [K], k é o coeficiente isentrópico e Ma é o número de Mach.

A pressão no bocal da turbina P_b [kPa] é:

$$P_b = \frac{P_0}{\left[1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) Ma^2 \right]^{\frac{k}{k-1}}} \quad (3.2)$$

Onde P_0 é a pressão do fluido antes de entrar no bocal [kPa].

A massa específica do fluido no bocal ρ_b [kg/m³] é definida por:

$$\rho_b = \frac{\rho_0}{\{1 + [(k-1)/2]Ma^2\}^{\frac{1}{k-1}}} \quad (3.3)$$

Onde ρ_0 é a massa específica do fluido antes de entrar no bocal em [kg/m³].

O bocal utilizado é sônico a fim de gerar a máxima velocidade de injeção do fluido. Dessa forma, a equação para o cálculo da velocidade do som a [m/s] do fluido é dada por:

$$a = \sqrt{kR_g T_b} \quad (3.4)$$

Onde R_g é a constante do gás [J/(kg K)].

A área do bocal A_b [m²] é dada por:

$$A_b = \frac{\dot{m}}{\rho_b a} \quad (3.5)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica do fluido em [kg/s].

Cálculo do número de discos da turbina Tesla.

A vazão mássica da turbina é dada por:

$$\dot{m} = \rho_b \pi V D b n \quad (3.6)$$

Onde V é a velocidade de injeção do fluido [m/s], D é o diâmetro do disco [m], b é o espaçamento entre os discos consecutivos [m] e n é o número de espaçamentos entre os discos. Isolando a equação 3.6 em função de Vb , tem-se:

$$Vb = \frac{\dot{m}}{\rho_b \pi D n} \quad (3.7)$$

O número de Reynolds para a turbina Tesla é:

$$\text{Re} = \frac{4\rho_b Vb}{3\mu} \quad (3.8)$$

Onde μ é a viscosidade cinemática do fluido de trabalho [kg/ms]. Isolando-se, novamente em função de Vb , a equação 3.8, tem-se:

$$Vb = \frac{3\mu \text{Re}}{4\rho_b} \quad (3.9)$$

Utilizando a equação 3.7 e 3.9, chega-se à equação:

$$n = \frac{4\dot{m}}{3\pi\mu D \text{Re}} \quad (3.10)$$

Onde o número de discos necessários é $n-1$.

Cálculo da camada limite laminar.

A camada limite laminar δ_L [mm] é dada por:

$$\delta_L = 5\sqrt{\frac{\nu\pi D}{V}} \quad (3.11)$$

Onde ν é a viscosidade dinâmica do fluido [m²/s].

Cálculo da camada limite turbulenta.

A camada limite turbulenta δ_T [mm] é dada por:

$$\delta_T = 0,526r_i \left(\frac{\nu}{r_i\omega} \right) \quad (3.12)$$

Onde r_i é o raio interno dos discos em [m], ω é a velocidade angular dos discos [rad/s].

Cálculo do torque para regime laminar de escoamento.

O torque para um lado do disco T_{L0} [N.m] é dado por:

$$T_{L0} = \frac{1}{4} \rho_b \omega^2 R^5 3,87 \left(\frac{R^2\omega}{\nu} \right)^{-1} \quad (3.13)$$

Onde R é o raio do disco [m].

O torque total T_L [N.m], para regime laminar, é calculado através da soma dos torques de ambos os lados do disco multiplicado pelo número total de discos da turbina, que é definido por:

$$T_L = 2(n-1)T_{L0} \quad (3.14)$$

Cálculo do torque em regime turbulento de escoamento.

O torque para um lado do disco T_{T0} [N.m] é:

$$T_{T0} = \frac{0,073}{2} \rho_b \omega^2 R^5 \left(\frac{\nu}{\omega R^2} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (3.15)$$

O torque total T_T [N.m], para regime turbulento, é calculado da mesma forma que o torque total laminar T_L sendo dado por:

$$T_T = 2(n-1)T_{T0} \quad (3.16)$$

Cálculo da potência gerada no eixo da turbina.

A potência total, para regime laminar, gerada no eixo da turbina P_L em [W] é dada por:

$$P_L = T_L \omega \quad (3.17)$$

Para regime turbulento de escoamento, a potência total, P_T [W] é:

$$P_T = T_T \omega \quad (3.18)$$

Cálculo da eficiência exergética para regime de escoamento laminar da turbina Tesla.

A eficiência exergética para regime laminar de escoamento η_L é dada por:

$$\eta_L = \frac{P_L}{\dot{m}[(h_0 - h_{amb}) - T_{amb}(s_0 - s_{amb})]} \quad (3.19)$$

Onde h_0 é a entalpia do fluido antes de entrar no bocal [J/kg], h_{amb} é a entalpia na temperatura ambiente [J/kg], s_0 é a entropia do fluido antes de entrar no bocal [J/(kgK)], s_{amb} é a entropia na temperatura ambiente [J/(kgK)] e T_{amb} é a temperatura ambiente do fluido [K].

A eficiência exergética para regime turbulento η_T é representada por:

$$\eta_T = \frac{P_T}{\dot{m}[(h_0 - h_{amb}) - T_{amb}(s_0 - s_{amb})]} \quad (3.20)$$

4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O problema consiste no modelamento de uma turbina Tesla e avaliação da sua sensibilidade com aplicação para um determinado fluido de trabalho, operando em determinadas condições. O fluido de trabalho escolhido é o ar seco, a uma vazão mássica unitária (1 kg/s) com temperatura de 500° C e pressão manométrica de 506,6 kPa. A temperatura ambiente considerada é 25° C.

4.1 Metodologia

Os parâmetros de entrada para o modelamento da turbina Tesla são a vazão mássica, a temperatura e a pressão do fluido de trabalho, antes do bocal.

Para o cálculo da temperatura, pressão e massa específica no interior do bocal, considera-se escoamento isentrópico e a velocidade inicial é desprezível na entrada do bocal. Em termos de modelamento, o número de Mach utilizado no bocal é 1. A temperatura, a pressão e a massa específica são calculadas através das equações 3.1, 3.2 e 3.3.

Segundo Batista (2009), uma boa condição de funcionamento da turbina Tesla é utilizar um bocal sônico de alimentação. Em virtude disso, a velocidade do som no fluido obtida na saída do bocal é expressa utilizando a equação 3.4 para gases perfeitos.

Para a definição da velocidade angular dos discos, utiliza-se o seguinte método: a potência gerada no eixo da turbina é zero quando a velocidade dos discos é zero ou quando a velocidade tangencial dos discos é igual à velocidade de injeção do fluido. Dessa forma, para o modelamento, considera-se a velocidade tangencial do disco igual à metade da velocidade de injeção do fluido. Essa consideração é feita na medida em que Batista (2009) realizou testes experimentais de bancada com uma turbina Tesla e detectou que a máxima potência gerada no eixo da máquina era próxima quando se utilizava essa consideração. A velocidade angular dos discos é 2611 rad/s.

A área do bocal é definida pela equação 3.5. Para determiná-la é preciso considerar a relação da vazão de entrada no bocal com a massa específica e a velocidade do som no fluido.

Para o cálculo do número de discos da turbina, usa-se a equação 3.10. Para esse dimensionamento é levado em consideração o número de Reynolds, a vazão mássica do fluido e o diâmetro dos discos. Quanto maior o número de Reynolds, menor é quantidade de discos a serem utilizados. A definição do número de Reynolds é em função do espaçamento entre os discos. Quanto maior o espaçamento entre os discos, maior será esse valor. A faixa de transição do número de Reynolds foi considerada como um escoamento no interior de uma tubulação, ou seja, 2300. Pode-se observar que haverá um intervalo de espaçamentos que corresponderá à faixa de transição do escoamento laminar para o turbulento. Esse intervalo não será considerado, uma vez que não foram apresentadas correlações para o cálculo do torque e potência para regimes em transição.

O cálculo da camada limite em regime laminar é dado pela equação 3.11 e para regime turbulento pela equação 3.12.

Para a definição do torque laminar utilizam-se as equações 3.13 e 3.14. Nesse cálculo, arbitra-se um intervalo do número de Reynolds laminar entre 200 e 2200 e um intervalo de diferentes raios dos discos da turbina a fim de avaliar a sensibilidade dos parâmetros de desempenho. O torque turbulento da máquina é definido pelas equações 3.15 e 3.16. Nesse cálculo também se impõe um intervalo do número de Reynolds turbulento entre 3500 a 6000. Da mesma forma, é definido o mesmo intervalo de raios do regime laminar para que possa ser avaliada a sensibilidade dos parâmetros de desempenho em regime turbulento. O motivo pela escolha desses intervalos do número de Reynolds é devido ao desconhecimento da validade dos intervalos de operação dessas correlações.

A potência laminar é determinada pela equação 3.17 e relaciona o torque total laminar do eixo da turbina com a velocidade angular dos discos. Para o cálculo da potência turbulenta, usa-se a equação 3.18 que relaciona a potência turbulenta com a velocidade angular dos discos.

A eficiência exergética laminar é definida pela equação 3.19, relacionando a potência laminar com a exergia do fluido em [W]. Define-se exergia o máximo trabalho útil que um fluido pode realizar quando está operando a partir de um dado estado, temperatura e pressão, em relação ao estado morto. Para a definição do estado morto, podem-se considerar condições de temperatura e pressão ambiente. A eficiência exergética turbulenta é apresentada pela equação 3.20 e ela relaciona a potência em regime turbulento de operação da turbomáquina com a exergia do fluido.

5. RESULTADOS

Para realizar o modelamento da turbina Tesla, o software utilizado foi o EES, *Engineering Equation Solver* (www.fchart.com), que possui bibliotecas com propriedades termodinâmicas de diversas substâncias, sendo muito utilizado na resolução de problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor.

O intervalo dos valores dos raios dos discos utilizado para avaliar a sensibilidade nos parâmetros de desempenho da turbina foi de 0,1 a 0,5 m. O raio interno dos discos é 0,04 mm.

A espessura da camada limite laminar calculada é 0,85 mm. Como há dois discos, há duas camadas, então esse valor deve ser dividido por 2, sendo o valor final de 0,425 mm. Para o cálculo da camada limite turbulenta, o mesmo procedimento é utilizado, resultando num valor de 1 mm.

A Figura 5 mostra a potência no eixo da turbina para regime laminar em função do intervalo do número de Reynolds. Observa-se que esses valores foram definidos através dos valores de espaçamento entre os discos.

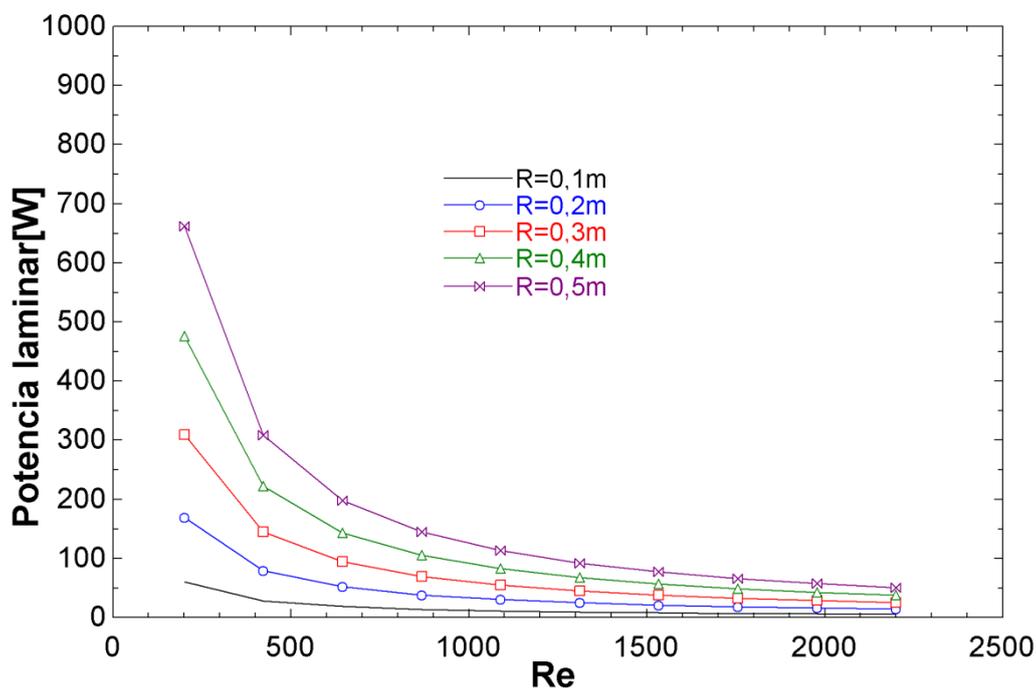


Figura 5: Potência em função do número de Reynolds para diversos valores de raio dos discos em regime laminar de escoamento para vazão mássica unitária.

Pode ser constatado que, com o aumento do raio, melhora-se a potência gerada no eixo da turbina na medida em que o tempo de contato entre o fluido e o disco é maior. O aumento do espaçamento entre os discos gera o aumento do número de Reynolds, ocasionando um valor de potência menor. O intervalo da dimensão do espaçamento entre os discos em regime

laminar de escoamento do fluido foi de 0,3mm a 0,7mm. Esse efeito da perda de potência ocorre devido à perda de contato do fluido com o disco.

A Figura 6 apresenta a potência da máquina em regime turbulento de operação.

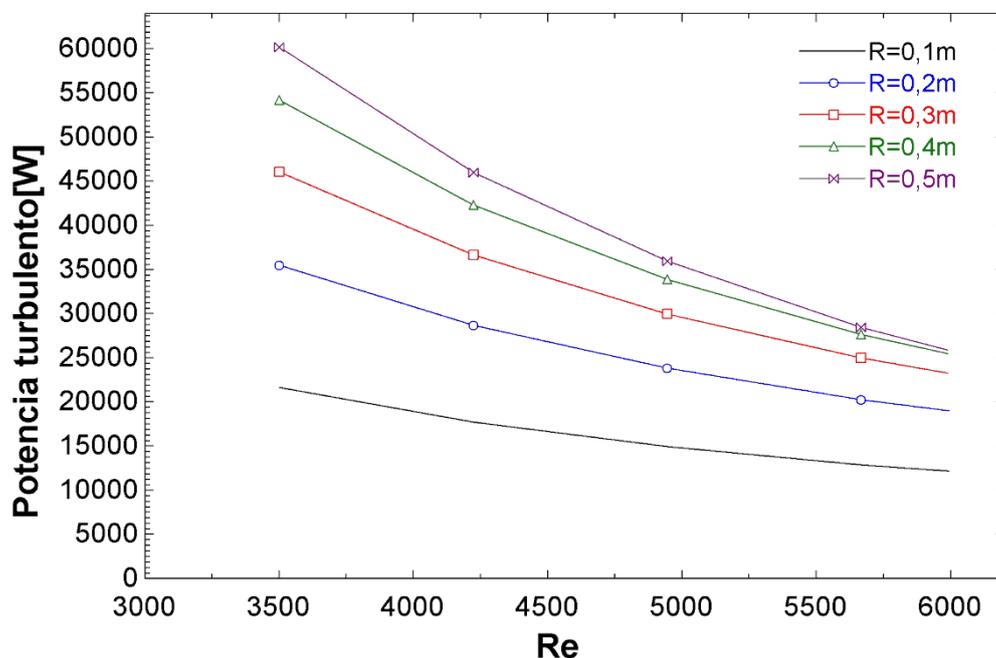


Figura 6: Potência em função do número de Reynolds para diversos valores de raio dos discos em regime turbulento de escoamento para vazão mássica unitária.

Pode ser observado pela Figura 6 que o aumento do raio gera uma melhoria na potência da turbomáquina. O aumento do espaçamento entre os discos ocasiona um número de Reynolds maior, gerando uma diminuição da potência gerada. O intervalo da dimensão do espaçamento entre os discos para regime turbulento de escoamento foi de 0,85mm a 1,4mm. Essa diminuição da potência se deve à perda do contato do fluido com a superfície do disco. Essa informação pode ser mostrada pelo cálculo da camada limite laminar e turbulenta.

A Figura 7 exhibe o gráfico da eficiência exérgica em regime laminar de operação.

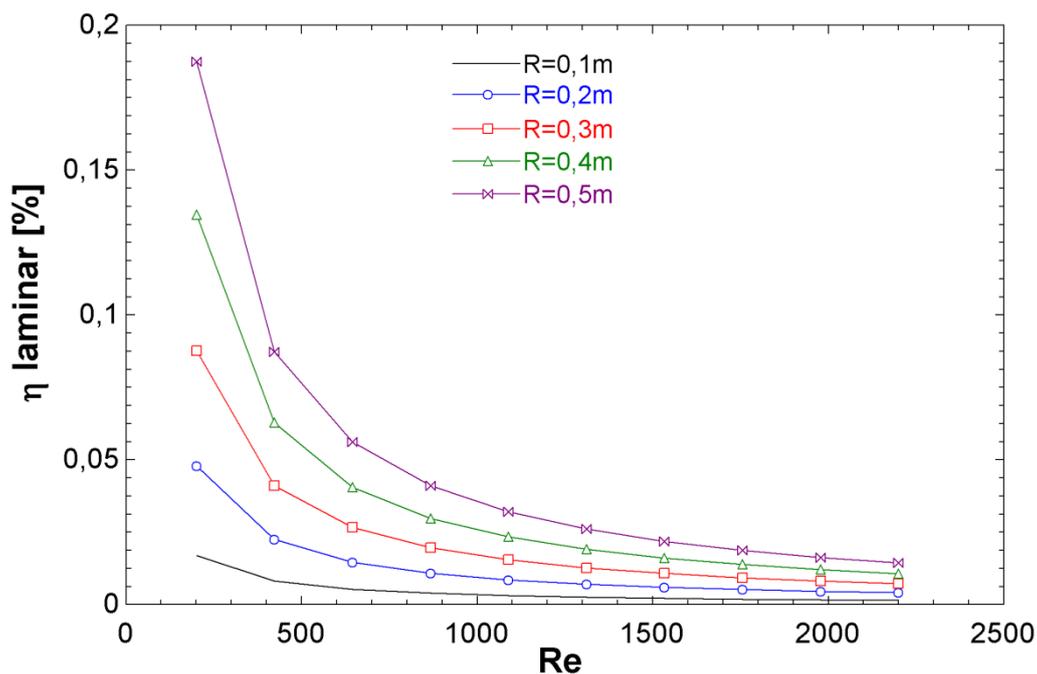


Figura 7: Eficiência exérgica [%] em função do número de Reynolds para vários valores de raio dos discos em regime laminar de operação.

Constata-se que o aumento do espaçamento entre os discos gera aumento no número de Reynolds e diminuição na eficiência. Isso ocorre uma vez que a potência no eixo do equipamento também é diminuída. Apesar disso, o aumento do tamanho do raio dos discos melhora a eficiência, pois a potência gerada é maior.

A Figura 8 expõe o gráfico da eficiência exérgica para condições de operação em regime turbulento.

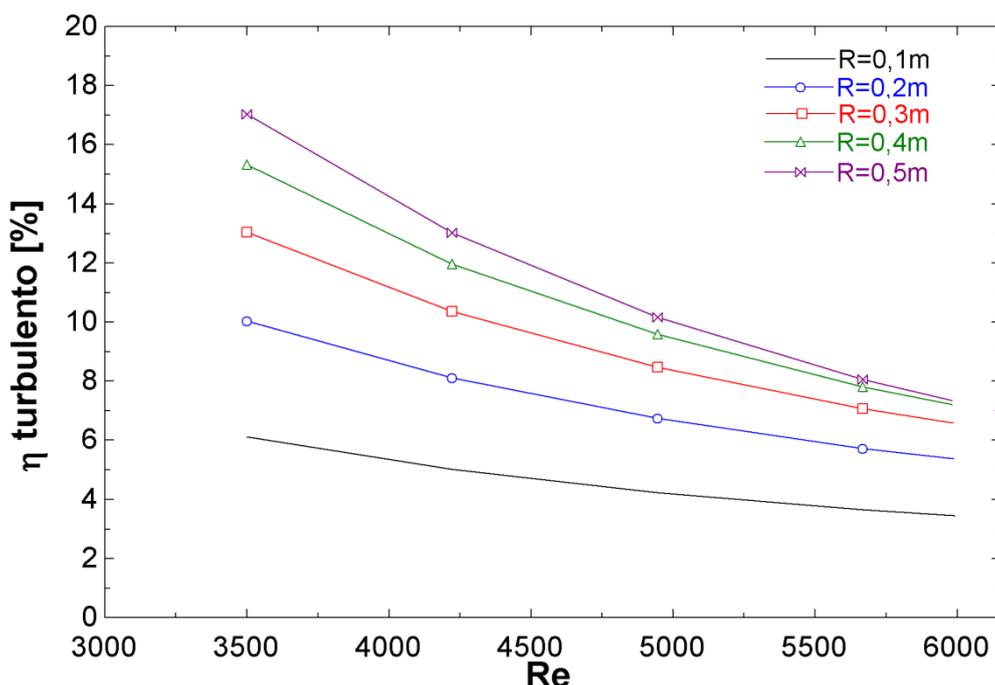


Figura 8: Eficiência exérgica [%] em função do número de Reynolds para vários valores de raio dos discos em regime turbulento de operação.

Observando a Figura 8 pode ser constatado que o aumento do raio dos discos ocasiona aumento da eficiência. Isso acontece, pois a potência gerada no eixo da máquina é maior. À medida que se aumenta o espaçamento entre os discos, amplifica-se o número de Reynolds, o que ocasiona uma menor eficiência.

Avaliando as Figuras 5, 6, 7 e 8 pode-se concluir que o aumento do espaçamento entre os discos gera uma diminuição na potência gerada no eixo da turbina e na eficiência exérgica em ambos regimes de trabalho. Isso ocorre uma vez que diminui o contato do fluido com a área de superfície do disco. Segundo Rice (1965) o aumento do tamanho do raio dos discos produz potências maiores devido ao maior tempo de contato do fluido com a parede dos discos, conforme pode ser visto pelas figuras 5 e 6. O equacionamento utilizado também é responsável por esse aumento de potência, pois o raio é elevado a um alto expoente. Em consequência do aumento da potência, as eficiências também são maiores.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo mostrou o modelamento de uma turbina Tesla utilizando ar seco como fluido de trabalho a pressão de 506,6 kPa e 500° C, avaliando a sensibilidade dos parâmetros de desempenho, potência e eficiência, com a variação do tamanho do raio dos discos.

Quando o espaçamento entre os discos é aumentado, o número de Reynolds é maior, o que gera menor potência e eficiência na turbina. Isso ocorre, pois o fluido de trabalho diminui seu contato com a superfície do disco. Como o princípio de funcionamento da turbina Tesla é a aderência do fluido à parede do disco, pode-se constatar que o resultado do estudo é satisfatório.

Avaliando as figuras 7 e 8, pode-se verificar que a eficiência em regime turbulento de trabalho é maior em comparação ao regime laminar devido à maior potência gerada no eixo. A maior eficiência em regime laminar foi de aproximadamente 0,2% e em regime turbulento foi 17,5%.

Para previsão de futuros trabalhos estimula-se avaliar a aplicação de uma turbina Tesla em uma tubulação de ar comprimido em alguma instalação industrial, com a função de gerar um rebaixamento de pressão qualquer. Dessa forma, pode-se converter a potência gerada no eixo da máquina em energia elétrica, aproveitada pela rede elétrica da empresa. Além disso, também pode ser avaliada a instalação da turbina no escapamento de um motor ciclo Diesel ou Otto a fim de utilizar os gases de escape para gerar potência. Essa potência pode ser usada no abastecimento da parte elétrica ou pode ser convertida em energia mecânica para gerar acelerações no veículo automotor como, por exemplo, em uma ultrapassagem como ocorre no sistema Kers dos veículos de competição. Como continuidade do estudo de sensibilidade, estimula-se realizar testes com diferentes rugosidades nos discos a fim de avaliar o torque gerado no eixo do equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Batista, J. C.; **“Micro Geração de Energia Elétrica Utilizando Turbina Tesla Modificada”**, 2009.

Cairns, W .M .J.; **“The Tesla Disk Turbine”**, 2003.

Couto, H. S., Duarte, J. B. F. Netto, D. B.; **“Tesla Turbine Revisited”**. Paper accepted for oral Presentation at the 8th APISCEU (Asian Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization), Sochi, Russia, Oct. 2006.

Emran, T, A.; **“Tesla Turbine Torque Modeling For Construction Of A Dynamometer And Turbine”**, 2001

Guha, A., Sengupta, S.; **“The Fluid Dynamics Of The Rotating Flow In A Tesla Disc Turbine”**, 2012.

Garret, P, B, A.; **“Performance and Market Evaluation of the Bladeless Turbine”**, 1982.

Ladino, A, F, R.; **“Numerical Simulation of the Flow Field in a Friction Type Turbine (Tesla Turbine)”**, 2004.

Lampart, P., Jedrzejewski, L.; **“Investigations of Aerodynamics of Tesla Bladeless Microturbines”**, 2011.

Lampart, P., Kosowski, K., Piwowarski, M., Jedrzejewski, L.; **“Design Analysis of Tesla Microturbine Operating on a Low Boiling Medium”**, 2009.

Rice, W.; **“An Analytical and Experimental Investigation of Multiple Disk Turbine”**, 1965.

Tesla, N.; **“Tesla Turbine”**, United States Patent No. 1061206. May 6, 1913.