

Uma Proposta de Otimização de Turbinas de Múltiplos Discos

C. F. Maidana*, C. Rech*
J. G. C. Balcazar*

*Universidade Federal de Santa Maria (UFSM - Campus Cachoeira do Sul)
Rodovia Taufik Germano 3013, Passo D'areia, Cachoeira do Sul/RS
(e-mail: cristiano.maidana@ufsm.br; charles@ufsm.br; juan.balcazar@ufsm.br)

Abstract: This paper examines the use of rotor discs with modified profiles proposed in order to increase the efficiency and power generated in multi-disc turbines. For this analysis, an analytical method is used to predict the efficiency and power produced by this type of device in conjunction with PIKAIA's evolutionary algorithm in order to obtain a rotor configuration that minimizes the power variation produced along the radius of the turbine rotor. The results indicate that a theoretical increase of up to 11.2% in the power generated by the turbine from the adoption of rough discs in the rotor.

Resumo: Este trabalho estuda o uso de rotores com discos modificados a fim de incrementar o rendimento e a potência gerada por turbinas de múltiplos discos. Para esta análise, um método analítico é usado para calcular o desempenho deste tipo de turbina em conjunto com o algoritmo evolutivo de PIKAIA, a fim de obter a configuração do rotor que minimiza a variação de potência produzida em função do raio do rotor. Os resultados obtidos indicam que é possível um aumento de até 11,2% na potência gerada pela turbina analisada através da adoção de um perfil de discos rugosos no rotor.

Keywords: Tesla turbine; rotor optimization; bulk-parameter method; multiple disc turbine; microgeneration.

Palavras-chaves: Turbina Tesla; otimização do rotor; método do fator de atrito; turbina de múltiplos discos; microgeração.

1. INTRODUÇÃO

A turbina de múltiplos discos (TMD), também conhecida como turbina Tesla, é um equipamento caracterizado pelo rotor consistir de uma série de discos lisos paralelos, posicionado de forma ortogonal em relação ao eixo do equipamento, a fim de formar pequenos espaços anulares para a circulação do fluido de trabalho. A Fig. 1 a seguir apresenta esquematicamente o funcionamento típico de uma turbina de múltiplos discos:

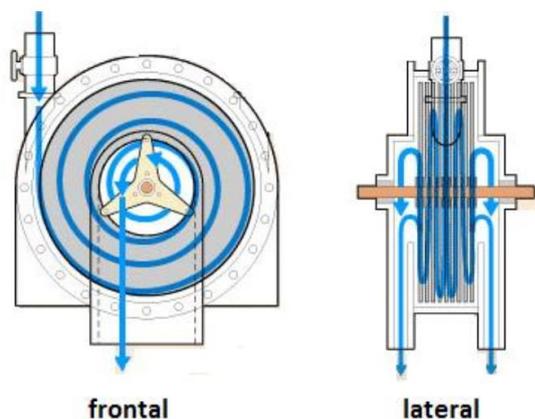


Fig. 1. Desenho esquemático de uma turbina de múltiplos discos (TMD) em operação, mostrando a trajetória do fluido.

Em uma TMD típica, o fluido é injetado na periferia dos discos do rotor, após ser acelerado pelo bocal, percorrendo

assim uma trajetória em espiral através dos discos, até que ocorra a sua saída através de orifícios localizados próximos ao eixo do rotor. Desta forma, diferente de uma turbina convencional, a geração de potência ocorre exclusivamente devido as tensões viscosas do escoamento do fluido sobre as superfícies dos discos do rotor. Desta forma, a variação da pressão estática do fluido em uma MDT ocorre inteiramente no bocal injetor.

A invenção das TMDs é atribuída a Nikola Tesla, através de uma série de patentes registradas no início do século XX. Além da descrição detalhada do equipamento, Tesla apresenta em seus trabalhos uma série de possíveis aplicações da turbina de múltiplos discos. Também há vários estudos recentes que apresentam utilizações deste dispositivo em microgeração e geração descentralizada de potência e energia elétrica. Cairns et al. (2001) mostraram que este tipo de equipamento pode ser competitivo em aplicações que exigem baixa potência e custo. Lampart et al. (2011) investigaram a utilização de turbinas de múltiplos discos em ciclos térmicos orgânicos de baixa potência (20 kW), mostrando-se bastante promissor para certos parâmetros de operação. Batista (2009) e Schmidt (2002) analisaram a aplicação de turbinas de múltiplos discos para a microgeração de energia elétrica a partir de biomassa (lenha), objetivando, entre outras aplicações, a utilização em locais remotos. Carey (2010) avaliou a utilização de TMDs para geração residencial de energia elétrica a partir de energia solar com a utilização de ciclos térmicos de potência a vapor, onde os resultados mostraram que é possível alcançar eficiências na ordem de 70% para necessidades que demandam baixas potências. Em seu estudo, Deam et al. (2010)

demonstraram que pequenas turbinas que operam segundo o princípio das TMDs sempre terão eficiências maiores que as turbinas convencionais. Estas características e possíveis aplicações das turbinas de múltiplos discos devem-se ao fato desta ser um equipamento de construção simples, capaz de operar em condições adversas, como, por exemplo, com fluidos suscetíveis a mudança de fase, impurezas ou muito viscosos.

Vários esforços vêm sendo empreendidos com o intuito de desenvolver modelos teóricos e semiempíricos para auxiliar o projeto e análise de TMDs, assim como no entendimento dos fenômenos físicos relacionados ao escoamento do fluido no interior do rotor. Os primeiros estudos relacionados remetem as décadas de 1950, 1960 e 1970 com os métodos analíticos propostos por Rice (1965) que obteve diversas equações para o cálculo da potência das bombas e compressores que funcionam segundo o princípio das TMDs. Felsch et al. (1981) desenvolveram expressões que descrevem o comportamento de fluidos considerados incompressíveis em escoamento laminar e não-isotérmico no interior de uma TMD. Couto et al. (2006) apresentaram um método de cálculo baseado em equações existentes para escoamentos sobre a superfície de um disco livre. Emran et al. (2011) obtiveram expressões analíticas para o cálculo da potência para diversos regimes de escoamento, considerando também TMDs com mais de um bocal injetor. Guha, et al. (2013) obtiveram equações semiempíricas a partir da análise das principais forças agindo no fluido em escoamento pelo rotor. Já Tahil (1998) obteve equações para o desempenho da TMD através de considerações de escoamento potencial em coordenadas cilíndricas. De uma forma geral, conforme descrito por Rice (2003), estes métodos podem ser classificados com base no regime de escoamento do fluido, em considerações com relação à formulação do fluido e no tipo de fluido de trabalho empregado. Em 2010, Carey, aperfeiçoou a análise descrita por Rice (1965) através da utilização do conceito de fator de atrito, obtendo assim equações mais simples válidas para o regime de escoamento laminar, demonstrando que estas possuem boa concordância com os resultados experimentais da TMD analisada no seu trabalho.

Neste trabalho é apresentada uma proposta de otimização da construção do rotor de uma TMD a partir da aplicação do algoritmo evolutivo de PIKAIA ao equacionamento modificado do método do fator de atrito proposto por Carey (2010), de forma a obter equações válidas para escoamentos em regime laminar e turbulento. Para isto, é considerado apenas uma otimização da rugosidade superficial do rotor, buscando analisar a viabilidade de aumentar o desempenho de turbinas de múltiplos discos mantendo a simplicidade de construção típica do dispositivo analisado. Desta forma, o objetivo é obter uma configuração de rugosidade superficial que possa ser aplicada igualmente a todos os discos que compõem o rotor da TMD através de métodos convencionais de obtenção de superfícies rugosas, como o jateamento abrasivo.

Foi considerado neste estudo que o fluido ao escoar no interior do rotor é incompressível, uma vez que, assim como nas turbinas classificadas como de ação, as variações de pressão no dispositivo analisado ocorrem exclusivamente no interior do bocal injetor. Como o escoamento na saída do bocal

de uma típica TMD pode atingir velocidade supersônica, foi admitido que o fluido é compressível no interior do bocal.

2. METODOLOGIA

2.1 O método do fator de atrito

O método do fator de atrito (BP) é utilizado para determinar a eficiência e potência obtida por uma TMD a partir do conhecimento das características geométricas do rotor e das propriedades do fluido de trabalho na saída do bocal injetor, sendo baseado em considerações relacionadas a interação entre o fluido e o rotor, sendo descrito através de um fator de atrito f . As equações para o cálculo da eficiência isentrópica e potência da turbina são obtidas através das equações de Navier-Stokes, considerando que no rotor há o escoamento de um fluido invíscido, incompressível e em regime laminar. As equações resultantes são resolvidas considerando que as forças viscosas age como forças de campo no escoamento. O método recebeu várias contribuições, sendo as mais relevantes dadas por Rice (1965) e Carey (2010).

De acordo com Carey (2010) a eficiência isentrópica da TMD pode ser determinada pelo método BP por:

$$\eta_{BP,L} = \frac{(\hat{W}_o + 1)U_o^2 - (\hat{W}_i + \xi_i)\xi_i U_o^2}{\frac{k}{k-1}RT_i \left[1 - \left(\frac{p_i}{p_o} \right)^{(k-1)/k} \right]} \quad (1)$$

onde ξ_i é a razão entre o raio de entrada e o raio de saída do fluido de trabalho no rotor, T_i é a sua temperatura na seção de entrada do bocal e p_o e $p_{i,no}$ são as pressões na saída da turbina e na entrada do bocal, respectivamente. A constante k é a razão entre os calores específicos do fluido de trabalho e R é a diferença, em módulo, entre estas propriedades. As velocidades tangenciais dos discos nas seções de entrada e de saída do fluido no rotor são dadas pelas variáveis U_i e U_o . As grandezas físicas \hat{W}_o e \hat{W}_i correspondem a velocidade adimensional do fluido no interior do rotor nas posições radiais de entrada e saída, r_o , e r_i , respectivamente, sendo definidas pela equação a seguir:

$$\hat{W} = \frac{v_\theta - U}{U_i} \quad (2)$$

onde v_θ é a velocidade absoluta do fluido em uma dada posição r do rotor. A partir da formulação dada pelo método do fator de atrito, a velocidade adimensional \hat{W} é determinada por:

$$\hat{W} = \frac{e^{24\xi^2/Re_m^*} \left[\frac{Re_m^*}{24} e^{-24\xi^2/Re_m^*} + \left(\hat{W}_o - \frac{Re_m^*}{24} \right) e^{-24\xi^2/Re_m^*} \right]}{\xi} \quad (3)$$

Na Eq.(3), o denominado número de Reynolds modificado, Re_m^* , é definido pela seguinte equação:

$$Re_m^* = \frac{D_h}{r_i} Re_{BP} \quad (4)$$

onde D_h é o diâmetro hidráulico do rotor, sendo igual ao dobro do espaçamento entre os discos do rotor. Pelo método do fator de atrito, o número de Reynolds, Re_{BP} , é dado por:

$$Re_{BP} = \frac{\dot{m}}{\pi r_i n \mu_i} \quad (5)$$

onde \dot{m} e μ_i correspondem, respectivamente, a vazão mássica e a viscosidade do fluido de trabalho na saída do bocal injetor, sendo n o número de discos presentes no rotor da turbina.

Da forma como foram obtidas por Carey (2010) as equações do método do fator de atrito são válidas somente para $Re_{BP} < 2300$ e para TMD's construídas com rotores formados por superfícies lisas. Entretanto, através da obtenção de uma equação geral para a velocidade adimensional do fluido, a formulação pode ser válida para outros regimes de escoamento e configurações de rotores. Assim, partindo da definição de fator de atrito apresentado por Romanin (2012):

$$f = \frac{Po}{24} \quad (6)$$

e utilizando a expressão de Navier-Stokes e as equações auxiliares apresentadas por Rice, (2010), obtém-se a seguinte expressão para a velocidade adimensional do fluido no rotor, \hat{W} :

$$\hat{W} = \frac{e^{Po\xi^2/Re_m^*}}{\xi} \left[\frac{Re_m^*}{Po} e^{-Po\xi^2/Re_m^*} + \left(\hat{W}_o - \frac{Re_m^*}{Po} \right) e^{-Po\xi^2/Re_m^*} \right] \quad (7)$$

A solução desta equação é obtida através do conhecimento do coeficiente de Poiseuille, Po , apropriado para o escoamento, ou, alternativamente, através de expressões para o cálculo do fator de atrito, f , juntamente com a Eq. (6). Desta forma, uma expressão análoga a Eq. (1) para o cálculo da eficiência isentrópica pode ser obtida com a aplicação das Eq. (6) e (7).

A determinação da potência útil da turbina pode ser obtida através da definição de eficiência isentrópica, dado pela Eq. (8):

$$\eta = W_{util}/W_{iso} \quad (8)$$

onde \dot{W}_{util} é a potência útil obtida no eixo da turbina e \dot{W}_{iso} a potência isentrópica que pode ser determinada pela Eq. (9):

$$\dot{W}_{iso} = \dot{m} \frac{k}{k-1} RT_i \left[1 - \left(\frac{p_i}{p_o} \right)^{k/(k-1)} \right] \quad (9)$$

2.1 Modelagem do bocal injetor

Uma das formas mais simples de modelar o comportamento do fluido em um bocal injetor é através da

modelagem unidimensional, onde considera-se o escoamento compressível, unidimensional e sem atrito. Segundo Carey (2010) sabendo-se que o bocal da turbina de múltiplos discos de Rice (1965) é do tipo convergente, a velocidade máxima que o fluido de trabalho poderia atingir é a do som, a qual pode ser determinada através da Eq. (10):

$$v_{\theta,ideal} = \sqrt{kRT_i} \quad (10)$$

A velocidade real na saída do bocal injetor, o que corresponde a velocidade de injeção na periferia dos discos do rotor, pode ser determinada a partir da definição de eficiência do bocal, que pode ser definida por:

$$\eta_{bocal} = v_{\theta,i}^2/v_{\theta,ideal}^2 \quad (11)$$

onde $v_{\theta,i}$ é a velocidade real do fluido na saída do bocal e na entrada do rotor. Carey (2010) determinou a partir das medidas experimentais realizadas na turbina de Rice (1965), que o bocal utilizado na TMD analisada possuía eficiência entre 0,44 e 0,52. Desta forma, considerou-se neste trabalho a eficiência do bocal como sendo igual a 0,48, o que corresponde a média dos valores de eficiência determinados.

2.2 Otimização dos discos do rotor

Para a otimização proposta, cada disco que compõe o rotor da TMD analisada foi dividido em dez partes de raio Δr_j , a fim de determinar a rugosidade ideal da sua superfície como função do raio do rotor, conforme mostrado esquematicamente na Fig. 2. O raio externo do rotor, próximo ao bocal injetor, possui raio (r_i) e o raio interno, onde está localizado o orifício de saída do fluido do rotor, possui raio (r_o). Desta forma, em cada seção Δr_j do rotor o fluido entra no raio r_{ij} e sai em r_{oj} .

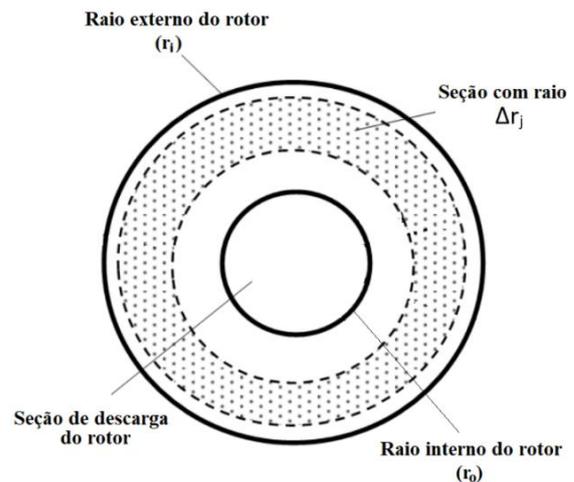


Fig. 2. Desenho esquemático mostrando a discretização do rotor da turbina para o estudo de otimização proposto.

A proposta de otimização pretendida consiste basicamente em incrementar a potência gerada e, como consequência, a eficiência, para cada seção de rotor Δr_j , através da alteração da rugosidade superficial para cada uma destas seções, sabendo

que o torque e a potência, como em qualquer dispositivo rotativo, é proporcional a distância em relação ao eixo, minimizando assim a variação de potência com o raio. Assim, a otimização proposta é equivalente a minimizar a seguinte função objetivo dada pela Eq. (12):

$$S_{\dot{W}_j} = \sqrt{\frac{1}{(n_j-1)} \sum |\Delta\dot{W}_j - \overline{\Delta\dot{W}_j}|} \quad (12)$$

onde $S_{\dot{W}_j}$ é o desvio padrão médio relacionado a potência $\Delta\dot{W}_j$ gerada em cada seção de discretização do disco do rotor Δr_j , em relação a média da potência de todas as seções de discretização consideradas, $\overline{\Delta\dot{W}_j}$. O valor de $\Delta\dot{W}_j$ é determinado a partir da aplicação do método do fator de atrito em cada seção Δr_j .

Para o processo de otimização a rotina usada baseia-se no algoritmo evolucionário de PIKAIA, versão 1.2, (Chambonneau, 2002). As condições de operação (valores constantes) estabelecidos para o processo de otimização foram obtidos dos valores médios da rotação do eixo, vazão do fluido de entrada e pressão na admissão do bocal injetor. Estes valores médios são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1. Condições de operação consideradas no processo de otimização da TMD.

Rotação (rpm)	Pressão de Entrada (kPa)	Temperatura de Entrada (K)	Vazão (kg/s)
6300	965	347	0,04536

Foi utilizado como principal restrição no algoritmo de otimização a rugosidade da superfície dos discos do rotor. Desta forma, foi estabelecido que a rugosidade poderia assumir valores entre 0 e 300 μm . Segundo Momber (2008) esta faixa de valores de rugosidade pode ser facilmente encontrada em alguns materiais metálicos comuns, podendo ser obtido através de processos típicos de modificação de acabamento superficial.

3. DISPOSITIVO ANALISADO

A TMD de Rice (1965) por meio do qual foram obtidos os resultados experimentais utilizados na análise, foi construída em aço, com dois bocais de injeção do tipo convergente diametralmente opostos e um rotor formado por 11 discos lisos, espaçados entre si por uma distância de 1,02 mm, de raio externo, r_i , de 88,90 mm e furos de exaustão localizados na posição radial $r_o = 33,50$ mm. Para a realização dos ensaios experimentais do dispositivo, Rice (1965) utilizou ar comprimido como fluido de trabalho, com pressões entre 276 kPa e 965 kPa e temperaturas entre 74°C e 95°C. A turbina na bancada de testes e o seu rotor são mostrados na Fig. 3 e Fig. 4, respectivamente:

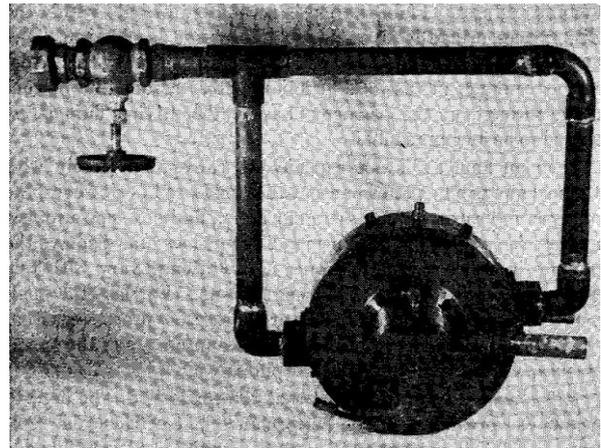


Fig.3. Turbina de múltiplos discos de Rice (1965) acoplada na bancada de ensaios.

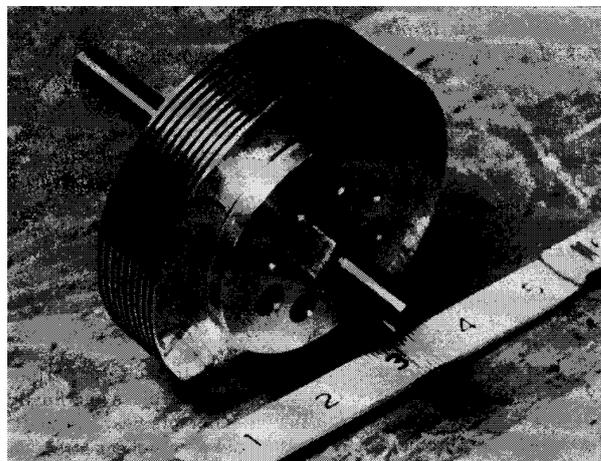


Fig. 4. Rotor da turbina de múltiplos discos de Rice (1965) acoplado ao seu eixo central, onde é medido o torque e potência produzida.

Os principais componentes da TMD analisada é apresentada de forma esquemática na Fig. 5:

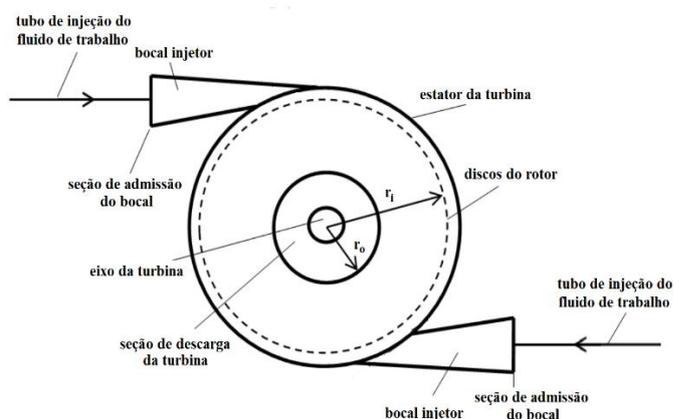


Fig. 5. Desenho esquemático da turbina analisada apresentando os principais componentes do equipamento relevantes para o estudo proposto.

As condições de operação testadas experimentalmente por Rice (1965) para a turbina analisada neste trabalho e os

respectivos valores de desempenho obtidos, são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2. Condições de operação e resultados obtidos experimentalmente por Rice (1965) para o desempenho da turbina analisada.

Rotação (rpm)	Pressão de Entrada (kPa)	Temperatura de Entrada (K)	Vazão (kg/s)	η_{exp} (%)
6300	377	368	0,0213	21,7
8500	377	368	0,0213	25,4
9200	377	368	0,0213	25,8
8000	515	352	0,0306	21,2
10000	515	352	0,0306	23,8
11000	515	352	0,0306	24,4
8000	552	356	0,0263	21,7
10000	552	356	0,0263	23,8
11000	552	356	0,0263	23,8
9000	690	353	0,0331	21,6
11000	690	353	0,0331	24,1
12000	690	353	0,0331	19,0
9300	827	347	0,0401	21,2
11000	827	347	0,0401	22,9
12200	827	347	0,0401	13,5
11800	965	347	0,0454	23,2
12500	965	347	0,0454	11,9

onde η_{exp} é o rendimento da TMD determinado experimentalmente por:

$$\eta_{exp} = \dot{W}_{eixo} / \dot{W}_{iso} \quad (13)$$

onde \dot{W}_{eixo} é a potência útil medida experimentalmente no eixo da turbina para cada uma das condições de operação no qual a turbina foi testada, sendo \dot{W}_{iso} determinado pela Eq. 9.

Maidana (2015) mostrou que entre os métodos analíticos e teóricos apresentados em diferentes estudos para modelagem e a análise de desempenho das turbinas de múltiplos discos, o método do fator de atrito é o que apresenta maior correspondência com os resultados obtidos experimentalmente para uma ampla faixa de regimes de operação.

Apesar de existirem resultados experimentais mais recentes, o estudo de Rice (1965) foi escolhido por apresentar com detalhes suficientes as condições de operação e as características construtivas da TMD, permitindo assim que metodologias de cálculo bastante distintas sejam comparadas.

4. RESULTADOS

As rugosidades obtidas para cada seção Δr_j do rotor da TMD analisada são apresentados na Tabela 3 a seguir. Estes valores de otimização foram determinados a partir de uma média daqueles determinados a partir dos resultados obtidos após vinte execuções do algoritmo utilizado.

Tabela 3. Condições de operação consideradas no processo de otimização da TMD.

Seção de discretização (j)	Rugosidade Superficial (μm)
1	4,55
2	6,16
3	9,48
4	23,6
5	60,4
6	171,0
7	268,0
8	280,0
9	290,0
10	295,0

Na Tabela 3, $j = 10$ se refere a seção Δr_j mais próxima ao eixo do rotor e $j = 1$ a seção de disco mais adjacente a periferia externa dos discos. A taxa de mutação escolhida no algoritmo evolutivo foi de 0,1, sendo este valor obtido após algumas simulações com taxas de mutação entre 0,1 e 0,7, onde verificou-se que as menores taxas de mutação causam menores variações nos resultados da função objetivo utilizada. No total foram realizadas 161000 avaliações da função objetivo, através de 248 gerações de indivíduos, ou seja, de sequência de bits obtidas a partir das variáveis livres do problema.

Os resultados no incremento que podem ser obtidos na eficiência da TMD são apresentados na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4. Incremento de potência obtido para cada uma das condições de operação da turbina analisada.

Rotação (rpm)	Pressão de Entrada (kPa)	Temperatura de Entrada (K)	Vazão (kg/s)	Aumento de Potência (%)
6300	377	368	0,0213	11,2
8500	377	368	0,0213	11,0
9200	377	368	0,0213	10,9
8000	515	352	0,0306	6,25
10000	515	352	0,0306	6,40
11000	515	352	0,0306	6,75
8000	552	356	0,0263	5,34
10000	552	356	0,0263	5,66
11000	552	356	0,0263	5,84
9000	690	353	0,0331	6,83
11000	690	353	0,0331	7,16
12000	690	353	0,0331	7,34
9300	827	347	0,0401	7,97
11000	827	347	0,0401	8,25
12200	827	347	0,0401	8,46
11800	965	347	0,0454	9,01
12500	965	347	0,0454	9,16

Para os cálculos de incrementos de potência apresentados na Tabela 4 foram utilizados como referência os valores desta grandeza física obtidos com a aplicação do método do fator de

atrito em cada condição de operação apresentada, onde a turbina foi testada na sua configuração original (rotor com discos lisos). Carey (2010) mostrou que há uma boa concordância do método do fator de atrito com os dados experimentais quando o objetivo é determinar a potência útil produzida por turbinas de múltiplos discos.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisado a possibilidade de otimização do rotor de uma turbina de múltiplos discos, também conhecida como turbina Tesla, a partir da aplicação de uma modificação proposta para o denominado método do fator atrito, proposto por Carey (2010) e de um algoritmo evolutivo (método PIKAIA), com o objetivo de estimar a eficiência e potência que poderiam ser obtidas na TMD. Desta forma, determinou-se que com a simples modificação no acabamento superficial dos discos do rotor, de forma a aumentar a contribuição de potência principalmente das seções do rotor próximas ao eixo, foi possível obter um aumento médio de potência do dispositivo de 7,86%, considerando, para este cálculo, as condições de operação da turbina testada por Rice, 1965. Constata-se que os maiores valores possíveis de rendimento ocorrem para baixas rotações e vazões, podendo chegar a 11,20%, o que correspondem as faixas de menores números de Reynolds. Estes valores de incremento de potência gerada foram determinados comparando com os valores obtidos pelo método do fator de atrito para a turbina padrão, uma vez que, conforme Carey (2010) e Maidana (2015) este método é capaz de prever com boa aproximação os valores de desempenho de TMD's. Este incremento foi possível devido ao aumento da rugosidade dos discos nas seções próximas aos orifícios de saída do fluido do rotor, proporcionando, deste modo, maior contribuição destas seções na geração de potência. Na turbina com discos lisos (original), a seção Δr_j mais adjacente aos orifícios de saída do fluido de trabalho do rotor contribuiu com somente 17% da potência gerada em cada disco do rotor, enquanto na turbina com discos rugosos (proposta deste estudo) contribuiu com 19%.

Conforme descrito na revisão bibliográfica deste trabalho, existem outras formas possíveis de realizar o incremento da potência de turbinas de múltiplos discos, uma vez que vários componentes, além do rotor, são passíveis de otimização, conforme relatado por Maidana (2015). Também pode-se ressaltar que devido a sua versatilidade e construção simples, o equipamento mostra-se promissor para a geração de energia elétrica descentralizada em locais remotos, assim como a recuperação energética de correntes residuais, cujo potencial não poderia ser aproveitado por outros dispositivos convencionais.

REFERÊNCIAS

Batista, J. C. (2009); *Microgeração de Energia Elétrica, (Abaixo de 100kW) Utilizando Turbina Tesla Modificada*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista.

Cairns, W. M. J., (2001). *The Tesla Disc Turbine*, Camden Miniature Steam Services, Reino Unido.

Carey, V. P., (2010). Assessment of Tesla Turbine Performance for Small Scale Rankine Combined Heat and Power Systems, *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol.132.

Charbonneau, P. (2002). Release Notes for PIKAIA 1.2, NCAR Technical Note 451+STR, *National Center for Atmospheric Research*. Boulder.

Couto, H. S., Duarte, J. B. F., Bastos-Netto, D., (2008). The Tesla Turbine Revisited. 8° *Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization*. Sochi.

Deam, R. T., Lemma, E., Mace, B., Collins, R. (2010). On Scaling Down Turbines to Millimeter Size. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, v.130.

Emran, T. A., Alexander, R. C., Stallings, C. T., DeMay, M. A., Traum, M. J., (2011). Method to Accurately Estimate Tesla Turbine Stall Torque for Dynamometer or Generator Load Selection. *In Proceedings of the ASME 2011 Early Career Technical Conference*, Atlanta, USA, v. 9, pp. 158-163.

Felsh, K. O., Piesche, M. (1981). Ein Beitrag zur Berechnung der Strömung in Einer Tesla-Turbine bei Temperaturabhängiger Zähigkeit des Fördermediums. *Archive of Applied Mechanics*, v.50, 1981.

Lampart, P. and Jdrzejewski, L., (2011). "Investigations of Aerodynamics of Tesla Bladeless Microturbines", *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 49.

Maidana, C. F. (2015). *Desenvolvimento de Turbinas de Múltiplos Discos: Estudo de Modelos Analíticos e Análise Experimental*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Momber, A. (2008). *Blast Cleaning Technology*. Springer, United States of America.

Rice, R. (1965). An Analytical and Experimental Investigation of Multiple-Disk Turbines. *Journal of Engineering for Power*, Vol. 87.

Rice, W. (2003). *Tesla Turbomachinery*. In E. Logan Jr., & R. Joy (Eds), *Handbook of Turbomachinery* (pp.680-718). CRC Press, Florida, Boca Raton.

Romanin, V. D. (2012). *Theory and Performance of Tesla Turbine*. Tese de Doutorado, University of California, San Diego, United States of America.

Schmidt, D. D. (2002). *Biomass Boundary Layer Turbine Power System*. EISG Final Report, Grand Forks.

Tahil, W. (1998). Theoretical Analysis of a Disk Turbine. *Tesla Engine Association News*, v. 15, pp. 18-19.