

## EFICIÊNCIA MECÂNICA DE TURBINA PARAFUSO DE ARQUIMEDES INVERTIDO

Jéssica Büchner Albizu<sup>1</sup>, José Junji Ota<sup>1</sup> e Paulo Cezar Büchner<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná, PPGERHA, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal de Viçosa, DEP, Brasil.

E-mail: buchner.albizu@ufpr.br, ota.dhs@ufpr.br, paulo.buchner@ufv.br

### Introdução

A turbina de parafuso invertido (ASG - Archimedes Screw Generator, conhecida comercialmente por turbina helicoidal) produz energia na escala de micro central hidrelétrica, introduzida pela primeira vez por Karl-August Radlik em 1991, sob a patente alemã DE 4139134 C2 (Radlik, 1997). Foi concebida para aproveitamentos hidrelétricos de baixa carga, usando o fluxo residual de córregos e rios. Seu funcionamento ocorre com o giro devido à atuação de pressão, com a passagem da água ao longo do seu comprimento. Dada a simplicidade do sistema, surge a necessidade de melhorar a sua eficiência. O estudo realizado por Lashofer (2012) encontrou eficiências máxima e média *in situ* de 75% e 69%, respectivamente. Estudos de laboratório mostram eficiências de até 90%. Esta diferença possivelmente ocorre por a velocidade de rotação no laboratório ser ajustada para condições ótimas, enquanto o mesmo não é verdadeiro para turbinas operadas *in situ* (Dellinger *et al.*, 2016).

Outra característica competitiva do ASG é a sua robustez, onde pequenos detritos podem passar pelas lâminas sem causar danos. Também é considerado amigável aos peixes, já que a maioria das espécies de peixes pode passar pelas lâminas sem ferimentos. Ainda há uma discussão sobre os casos em que a velocidade de rotação é alta de forma que atinja uma velocidade tangencial de mais de 4,5 ms<sup>-1</sup> e para espécies de peixes de pequeno porte, que podem ser pegos pela fenda entre as lâminas e a calha (Lubitz *et al.*, 2014). Com o intuito de aumentar a eficiência e chegar ao estado da arte da turbina, procuram-se parâmetros geométricos do ASG que possam ser melhorados. Algumas hipóteses são: modificações na calha de forma a diminuir a perda de água por entre a calha e as lâminas; na inclinação das lâminas e da calha, escolhendo a mais apropriada para o escoamento e que maximize a geração de torque. É possível simular computacionalmente a fim de identificar mudanças positivas, que futuramente possam ser estudadas inclusive com modelos reduzidos. Esse é objetivo da dissertação de mestrado *Análise e Modelagem da Turbina Parafuso de Arquimedes Invertido*, pesquisa realizada na UFPR.

### Características e mecanismos da turbina

A Figura 1 mostra uma seção longitudinal típica de um ASG. A turbina consiste de um eixo – envolto por lâminas na forma de hélices – que se apoia nas extremidades em mancais alojada em uma calha na forma de meia cana, que constitui o canal de passagem da água. O conjunto é instalado em um canal de aproximação de concreto. Assim, a água se aproxima do sistema na parte superior do parafuso e flui para dentro da estrutura.

Como uma das características geométricas do ASG, há o volume de água preso entre duas lâminas, quando preenchido no volume ótimo, o qual é nomeado como “um balde” (em referência ao inglês bucket). A altura de entrada (carga) é  $h_{in}$  e a altura de lâmina d'água de jusante  $h_4$ . Outro aspecto importante é o avanço ( $S$ ), que é o comprimento de uma volta completa de uma lâmina. A energia potencial é a carga  $H$ . Além disso,  $R_i$  e  $R_a$  são os raios interno e externo, respectivamente. A inclinação da calha é representada como  $\beta$  e a velocidade de rotação da turbina é  $n$ .

Os cálculos da potência produzida pela turbina levam em conta a quantidade de água necessária para girar o parafuso, gerando eletricidade. O fluxo determina a velocidade de rotação e os níveis de água do sistema para uma dada geometria. Por outro lado, os efeitos das perdas por vazamento e fricção impedem a transformação do potencial em energia elétrica, afetando assim a eficiência. Nas seções a seguir, são apresentados breves comentários sobre cada um dos parâmetros que afetam o desempenho do ASG.

**Carga de entrada ( $h_{in}$ ):** a carga de entrada requerida é aquela que garante um ótimo preenchimento de volume de água. Nuernberk & Rorres (2013) criaram um algoritmo para calcular a carga de entrada. Eles determinaram que até 20% de transbordo tem um baixo impacto na eficiência, embora um enchimento mais baixo afete mais rapidamente de forma negativa o desempenho.

**Altura a jusante ( $h_4$ ):** de acordo com a Dellinger *et al.* (2016), o nível a jusante ideal está abaixo da linha onde a água pode fluir retornando para o interior do parafuso. Dellinger *et al.* (2016)

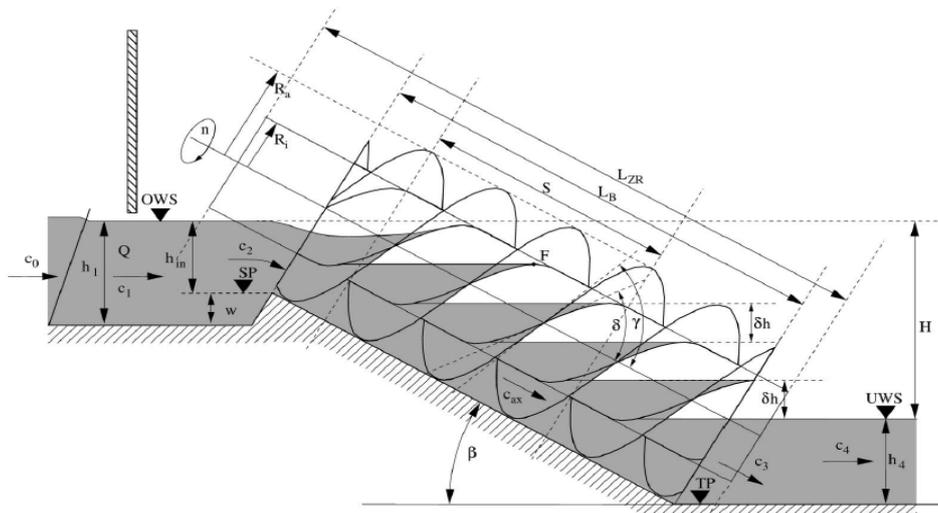


Figura 1.- Seção longitudinal típica de um ASG (Nuernberk & Rorres, 2013).

implementaram testes para avaliar diferentes níveis de saída e declives a velocidades e vazões constantes. Para comparar os resultados obtidos, os autores definiram a chamada imersão por parafuso I como (adaptado ao parâmetros da Figura 1):

$$I = \frac{h_4}{(2R_a \cos \beta)} \quad [1]$$

Os resultados mostraram um valor máximo de I de cerca de 0,64.

*Relação entre diâmetros interno e externo ( $D_i/D_a$ ):* uma análise teórica da geometria do parafuso de Arquimedes realizada por Rorres (2000) apresentou que a relação entre os diâmetros interno e externo  $D_i/D_a = 0,54$  resulta no balde de volume máximo. Lashofer *et al.* (2012) relataram que a maioria dos ASG comerciais instalados observados apresentaram valores de  $D_i/D_a$  aproximadamente 0,5.

*Avanço (S):* Utilizado usualmente o valor de  $D_a$  (Lashofer *et al.*, 2012; Dellinger *et al.*, 2016; Lubitz *et al.*, 2014).

*Velocidade de rotação (n):* Nuernberg & Rorres (2013), apresentam a seguinte expressão para a velocidade de rotação máxima de um parafuso usado como uma bomba:

$$n \leq \frac{50}{(2R_a)^{2/3}} \text{ (min}^{-1}\text{)} \quad [2]$$

Essa relação empírica indica que velocidades de rotação acima desse valor produzem fricção excessiva e forças centrífugas.

*Inclinação ( $\beta$ ):* o modelo teórico executado por Lubitz *et al.* (2014) indica que, ao levar em consideração a vazão perdida de um balde para o seguinte, a diminuição da inclinação aumentará a eficiência do parafuso, porém um incremento no comprimento do parafuso aumenta ao mesmo tempo as perdas do rolamento e da fricção, de forma que se observa que para um enchimento ótimo o ângulo de maior torque é 30°.

*Perdas por vazamentos ( $Q_p$ ):* a vazão perdida quando vaza por sobre a calha pode ser eliminada com uma guia (Figura 2).

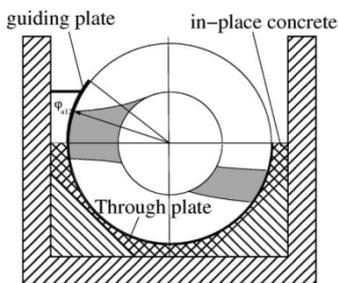


Figura 2.- Placa guia (Nuernberg & Rorres, 2013).

Outro vazamento é o fluxo entre as lâminas e a calha. Após o primeiro balde, o volume de água em cada balde permanece o mesmo, de forma que o vazamento se equilibra. A medição desse fluxo é uma questão bastante complexa. Para eliminar o vazamento da lacuna foi tentada uma calha rotativa. Menores eficiências foram encontradas quando comparadas a um ASG com uma calha fixa (Dellinger *et al.*, 2016).

O excesso de enchimento forma um vertedouro triangular causando o terceiro tipo de vazamento (Figura 2). Dellinger *et al.* (2016) encontraram resultados validados com Brada (1996b), concluindo que uma turbina de parafuso invertido pode lidar com uma vazão de até 120% da taxa de enchimento ideal sem perda significativa de eficiência.

O último tipo é o fluxo de vazamento que se dá pela água aderida às lâminas (Nuernberg & Rorres, 2013), causada pela combinação da viscosidade e a tensão superficial do fluido, da rugosidade das lâminas e seu movimento.

Perdas por fricção: Lubitz *et al.* (2014) concluiu que a energia deve ser perdida através de outros mecanismos, como a fricção. Sendo a força de atrito dividida pelas diferentes regiões onde ocorre: na calha, devido à viscosidade do fluido em movimento; ao longo do sistema do parafuso, nas superfícies molhadas e inferiores das lâminas; no núcleo do parafuso, criando um torque resistente.

Como exposto em Dellinger *et al.* (2016), a potência é dada por:

$$P_{ASG} = \rho g Q H \eta_{ASG} \quad [3]$$

Onde  $P_{ASG}$  é a potência do parafuso,  $\rho$  é a densidade da água,  $Q$  é a vazão,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $H$  é a carga  $\eta_{ASG}$  é a eficiência da turbina, a qual é dada pela formulação:

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P_{losses}}{P_{hydraulic}} = 1 - \frac{P_l + P_{over} + P_{blade} + P_{trough} + P_{core}}{\rho g Q H} \quad [4]$$

Sendo  $P$  para potência e os índices *losses*, para todas as perdas do sistema; *hydraulic*, para o ganho de energia da massa de fluido; *blade*, para perdas entre fluido e lâminas; *core*, para perdas entre fluido e eixo; *l*, perdas por vazamento; *over*, para perdas por excesso de enchimento; e *trough*, para perdas entre fluido e calha.

## Considerações finais

A turbina parafuso de Arquimedes invertido teve interesse mais intensificado na última década, principalmente devido aos baixos custos e impactos e sua alta robustez. As pesquisas desenvolvidas recentemente agregam muitas informações a respeito do mecanismo de geração e contribuem em busca de uma melhor eficiência. Apesar das conclusões, estudos mais completos e explicações mais profundas são necessários.

Nesse sentido, o estudo em desenvolvimento na UFPR tem como objetivo a simulação computacional de modificações na calha a fim de diminuir a perda por entre a calha e as lâminas; na inclinação das próprias lâminas e da calha, escolhendo a mais apropriada para o escoamento e que usufrua ao máximo a geração de torque.

## Referências bibliográficas

- ANEEL (2003). *Energia Hidráulica: 4.6 – Centrais Hidrelétricas em operação no Brasil*. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_hidraulica/4\\_6.htm](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_hidraulica/4_6.htm)>. Acesso em: 03 nov. 2017.
- Dellinger, G., Terfous A., Garambois P.-A. & Ghenaim A. (2016). *Experimental investigation and performance analysis of Archimedes screw generator*. Journal of Hydraulic Research, 54(2), 197-209.
- Lashofer, A., Hawle, W., Kampel, I., Kaltemberger F., Pelikan, B. (2012). *State of technology and design guidelines for the Archimedes screw turbine*. Hydro 2012. Bilbao, Spain.
- Lee, K. W., Kim, E. S., Chu W. S., Ahn, S. H. (2015). *Design and 3D printing of controllable-pitch archimedean screw for pico-hydropower generation*. Journal of Mechanical Science and Technology, 29(11). DOI 10.1007/s12206-015-1032-y.
- Lubitz, W., Lyons, M., & Simmons, S. (2014). *Performance model of archimedes screw hydro turbines with variable fill level*. Journal of Hydraulic Engineering, 140(10). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000922](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000922)
- Muysken, J. (1932). "Berekening van het nuttig effect van de vijzel." De Ingenieur, 21, 77-91.
- Nuernbergk, M., & Rorres, C. (2013). *Analytical model for water inflow of an Archimedes Screw used in hydropower generation*. Journal of Hydraulic Engineering, 139(2), 213-220.
- Radlik, K.-A. (1997). *Wasserkraftschnecke zur Energieumwandlung*. [Hydrodynamic screw for energy conversion]. Patente nº DE 4139134 C2.