

# A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO O VAPOR SATURADO DE PROCESSO<sup>1</sup>

Marcos Luiz de Macedo Rodrigues<sup>2</sup>  
Marco Aurélio Guimarães Monteiro<sup>3</sup>

## Resumo

O vapor saturado é utilizado para troca térmica em diversas aplicações industriais. Foi instalado um Gerador a Parafuso Helicoidal que utiliza a expansão do vapor saturado para gerar energia elétrica. O objetivo deste trabalho é apresentar esta solução com suas características técnicas, vantagens, limitações, detalhamento de sua montagem e os resultados alcançados na instalação realizada em uma indústria em Minas Gerais. Uma das principais características deste processo é que não se necessita de combustível para a mesma, se utilizando nesta aplicação, da necessidade de se reduzir a pressão de vapor. A análise técnica inclui uma abordagem com a Segunda Lei da Termodinâmica e a quantificação da redução das Irreversibilidades do sistema. Também se objetiva uma análise econômica do investimento, bem como a viabilidade de sua instalação. Um dos dados a serem obtidos é a relação R\$/MW instalado e a comparação com outras fontes de geração de energia elétrica.

**Palavras chave:** Vapor saturado; Energia elétrica; Irreversibilidades.

## THE ELETRICITY GENERATION USING SATURATED STEAM PROCESS

### Abstract

The saturated steam is used for heat exchange in various industrial applications. It was installed a generator that uses the Helical Screw the expansion of saturated steam to generate electricity. The objective of this paper is to present this solution with their technical characteristics, advantages, limitations, detailing its assembly and achievements made in the installation in an industry in Minas Gerais. A major feature of this process is that no fuel is needed for the same, if using this application, the need to reduce the vapor pressure. Technical analysis includes an approach to the Second Law of Thermodynamics and the quantification of the reduction of irreversibilities system. It also aims an economic analysis of the investment, and the feasibility of its installation. One of the data to be obtained is the ratio R\$/MW installed and compared with other sources of electricity generation.

**Keywords:** Saturated steam, electricity, irreversibilities.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 34º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 28º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 28 a 30 de agosto de 2013, Vitória, ES.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico. Mestre. Diretor Técnico, Enersolution Consultoria em Energia Ltda, Belo Horizonte, MG, Brasil*

<sup>3</sup> *Engenheiro Eletricista. Gerente de Engenharia, Efficientia S/A, Belo Horizonte, MG, Brasil*

# 1 INTRODUÇÃO

O vapor saturado é utilizado em diversas aplicações industriais principalmente em sistemas de troca térmica. Existem equipamentos e processos onde se necessita de aquecimento, cocção, esterilização, evaporação, provocar vácuo, secagem e diversas outras etapas nos processos produtivos que necessitam deste fluido.

Os segmentos onde se utiliza vapor saturado de forma intensiva são o alimentício (açúcar, carnes, cerveja, laticínios, soja, sucos, tomate etc), farinhas, farmacêutico, madeira, metalurgia (Alumínio, Carbonato de Cálcio, Cobre, Níquel, Zinco), papel, papelão, químicas, siderurgia, têxtil, dentre outros.

A pressão de vapor saturado varia normalmente de 7,0 a 25,0 bar sendo a temperatura de saturação respectivamente, 169,6 °C e 225,0 °C.

Em alguns equipamentos que utilizam o vapor saturado se necessita de reduzir a pressão do mesmo. Os motivos principais são os seguintes: (i) os equipamentos não suportam a pressão de geração de vapor e/ou (ii) o processo necessita de uma temperatura menor que a contida no vapor gerado na caldeira.

Por outro lado, para se reduzir a pressão do vapor saturado as válvulas provocam uma restrição ao fluxo. A mesma é também chamada de “perda de carga”. Ou seja, necessita-se de realizar uma perda de energia no fluido. Esta perda de energia pode ser também identificada como uma irreversibilidade que é calculada pela Segunda Lei da Termodinâmica.

Conforme Cuadra e Capilla,<sup>(1)</sup> “a irreversibilidade de cada subsistema pode ser descrito como”:

$$I = F - P - L > 0 \quad (1)$$

Onde:

$I$  = Irreversibilidade;

$F$  = Fuel ou recurso;

$P$  = Produto ou resultado;

$L$  = Perda.

Segundo Rodrigues,<sup>(2)</sup> “em um ciclo termodinâmico existe a necessidade de se quantificar a máxima energia disponível para cada fluxo, visando identificar os fluxos com maior capacidade de realização de trabalho”. Esta energia disponível é chamada de Exergia. Na equação 2, é definida a exergia de um fluxo:

$$B_f = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0) \quad (2)$$

Onde:

$B_f$  = Exergia do fluxo;

$H$  e  $H_0$  = Entalpia do fluxo e Entalpia do ambiente de referência;

$T_0$  = Temperatura de ambiente de referência;

$S$  e  $S_0$  = Entropia do fluxo e Entropia do ambiente de referência.

De acordo com Cuadra e Capilla<sup>1</sup>, “a disponibilidade de cada ponto de entrada e saída de determinado volume de controle é definida por”:

$$a_f = (h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0) \quad (3)$$

Onde:

$a_f$  = Disponibilidade específica;

$h_0$ ,  $T_0$  e  $s_0$  = Entalpia específica, temperatura e entropia específica nas condições do ambiente de referência;

$h_1$  = Entalpia específica na entrada de vapor da válvula redutora;

$s_1$  = Entropia específica na entrada de vapor da válvula redutora.

Ao se comparar as equações 2 e 3, encontra-se a equação 4:

$$B_f = a_f \cdot \dot{m}_f \quad (4)$$

Onde:

$\dot{m}_f$  = Vazão mássica do fluxo.

## 2 TURBO GERADOR A PARAFUSO HELICOIDAL

A empresa Jiangxi Hua Dian Electric Power Co., Ltd.<sup>(3)</sup> está localizada na China e desenvolveu o Turbo Gerador a Parafuso Helicoidal. O mesmo possui como componente básico um par de parafusos helicoidais e uma carcaça.

O vapor saturado ao percorrer o par de parafusos helicoidais reduz a sua pressão e a sua expansão volumétrica movimentam os dois elementos helicoidais. Como mostrado na Figura 1, o vapor entra no sulco A e percorre as posições B, C e D até sair pelo sulco E em um processo contínuo. Na Figura 2 é mostrada uma foto do par de parafusos helicoidais.

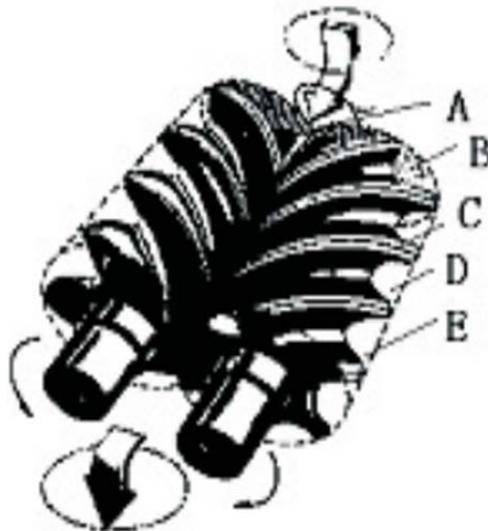


Figura 1: Fluxo de vapor pelo par de parafusos .<sup>(3)</sup>



**Figura 2:** Par de parafusos helicoidais.<sup>(3)</sup>

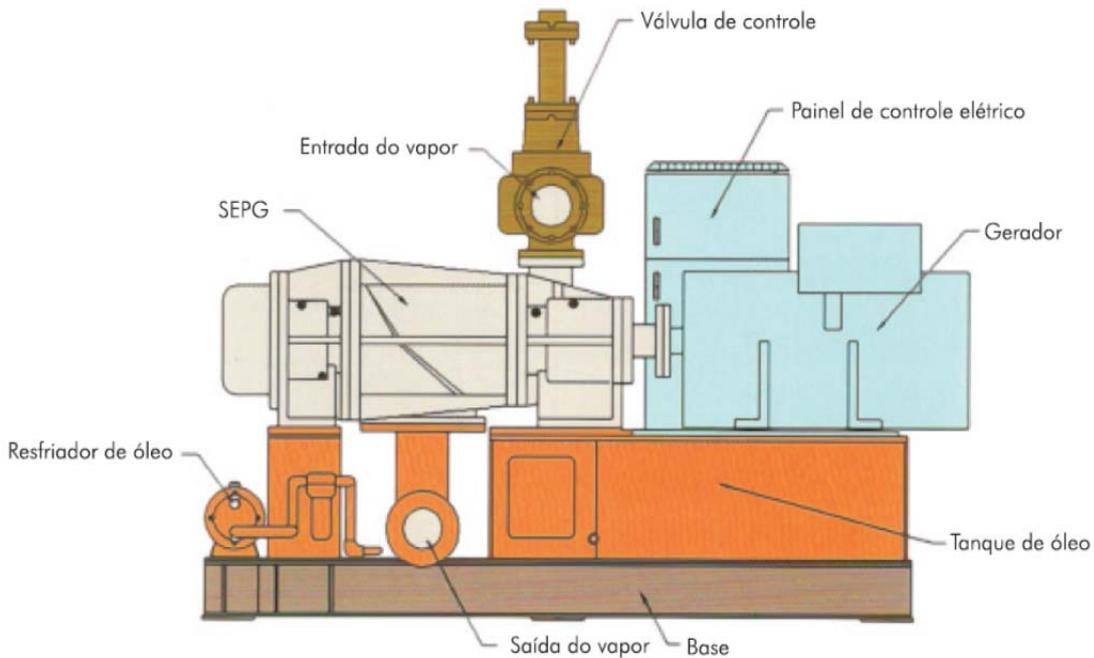
## **2.1 Vantagens da Utilização do Gerador a Parafuso Helicoidal**

As vantagens da utilização do Turbo Gerador a Parafuso Helicoidal são diversas, sendo que se destacam as seguintes:

- não necessita de combustível adicional para gerar energia elétrica;
- recupera calor residual;
- aplicável a vapor saturado com qualquer título;
- aceita baixas pressões de operação;
- aplicável a vapor de fluidos refrigerantes;
- absorve variações de pressão e vazão;
- montagem modular ocupando pequeno espaço;
- modelos aplicáveis a variadas vazões de vapor (3 a 200 ton/h);
- operação simples;
- fácil manutenção.

## **2.2 Montagem do Gerador a Parafuso Helicoidal**

O par de parafusos helicoidais (SEPG) é montado em um chassi com uma válvula de controle na entrada, uma válvula de fecho rápido, um tanque de óleo de lubrificação, uma bomba de óleo lubrificante, um trocador de calor de placas para o resfriamento do óleo, um redutor, um gerador elétrico e um painel de controle elétrico. Na Figura 3, pode-se verificar estes itens montados.



**Figura 3:** Composição básica.<sup>(3)</sup>

## 2.3 Características Técnicas

Suas características técnicas são as seguintes:

- Pressão de acionamento: de 0,30 a 2,5 MPa (3,0 a 25,0 bar);
- $\Delta P$  (diferença de pressão entre entrada e saída): de 0,4 a 1,5 MPa (4,0 a 15,0 bar);
- Temperatura de vapor saturado: 143 a 226°C;
- Potência gerada: 1 a 3.000 kW.

## 3 RESULTADOS

O primeiro Turbo Gerador a Parafuso Helicoidal montado fora da China está em operação em Minas Gerais desde Abril de 2012, gerando em torno de 300 kW. Nas Figuras 4 e 5 podem-se verificar os detalhes de sua instalação.

Foi adotada a temperatura de referencia 290,0 K, a pressão de referencia de 0,0 MPa (relativa) e a vazão mássica de 6,11 kg/s (22.000 kg/h).

As pressões de vapor saturado são de 0,93 MPa (9,3 bar) na entrada no Gerador a Parafuso Helicoidal e de 0,53 MPa (5,3 bar) na saída do mesmo (Figura 4).

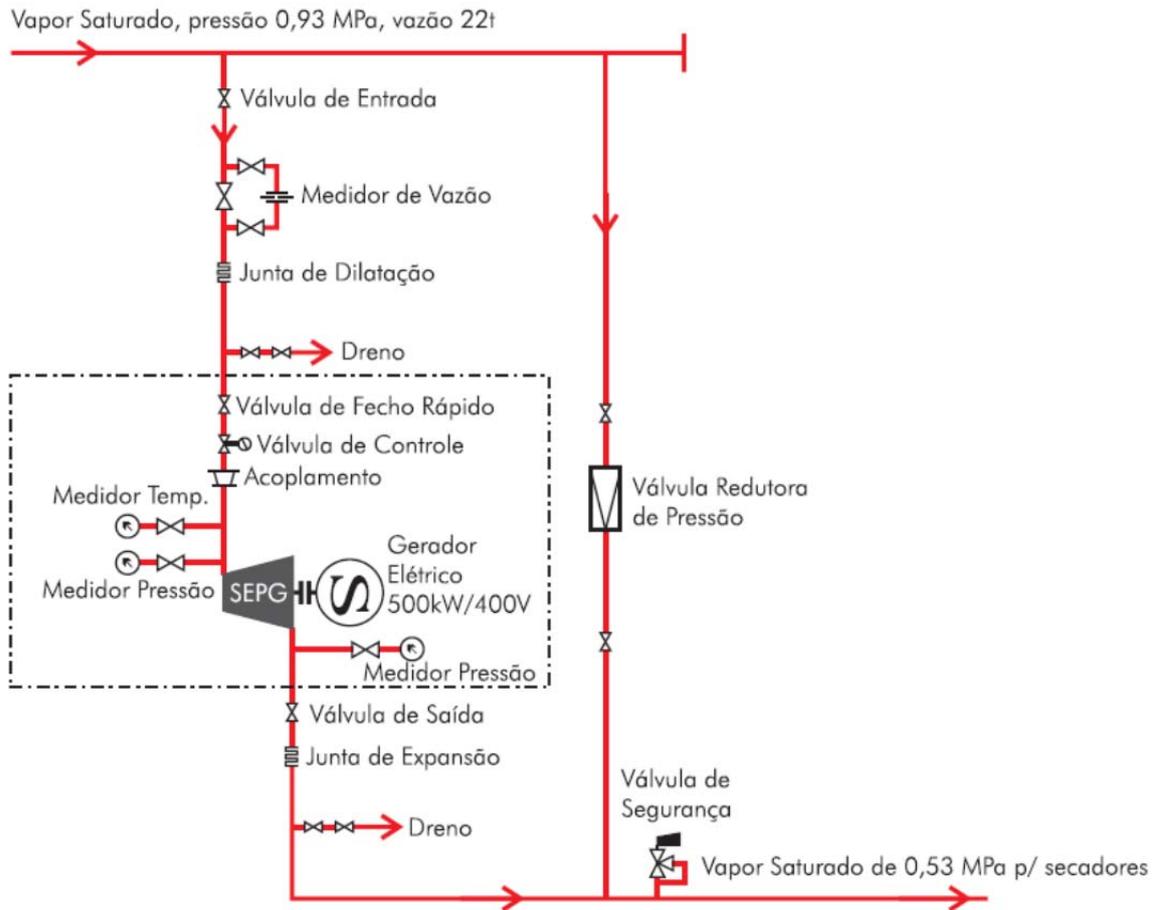


Figura 4: Fluxograma da instalação.<sup>(3)</sup>



Figura 5: Parafuso helicoidal montado.<sup>(3)</sup>

Com as pressões citadas, na Tabela 1 listam-se as suas respectivas propriedades termodinâmicas:

**Tabela 1:** Propriedades termodinâmicas

<b>Pressão Relativa (MPa)</b>	<b>Entalpia (kJ/kg)</b>	<b>Entropia (kJ/kg K)</b>
0,93	2.778,2	6,5751
0,53	2.758,1	6,7435
0,0	417,4	1,3026

Ao se substituir os valores citados da Tabela 1 nas equações de 1 a 4, encontram-se os seguintes resultados:

Exergia na entrada do gerador parafuso =  $B1 = F = 5.083,0$  kW;

Exergia na saída do gerador parafuso =  $B2 = P = 4.661,0$  kW;

Irreversibilidade =  $I = 422,0$  kW.

Porém, como o Gerador a Parafuso Helicoidal gerou 300 kW a Irreversibilidade caiu para 122,0 kW.

#### **4 DISCUSSÃO**

Com o gerador a parafuso helicoidal operando nas condições citadas o mesmo fornece o vapor saturado para o processo, tal como uma válvula redutora de pressão, fornecendo trabalho em seu eixo ao gerador de energia elétrica.

Com isto é aproveitado parte da exergia contida no vapor saturado a montante do mesmo.

Não se tem conhecimento de outro equipamento ou sistema que opere nas mesmas condições com vapor saturado.

O valor para a implantação do gerador a parafuso helicoidal foi de aproximadamente R\$2.300.000,00 para a aquisição do equipamento com capacidade de 500 kW, montagens mecânica e elétrica. Este valor projetado para 1,0 MW seria em torno de R\$4.600.000,00. Ou seja, um investimento em geração de energia em um valor próximo de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH). Conforme a FGV,<sup>(4)</sup> para este tipo de geração, o valor de investimento é de R\$5.500.000,00/MW.

#### **5 CONCLUSÃO**

O Turbo Gerador a Parafuso Helicoidal em aplicações de redução de pressão com vapor saturado se mostra uma solução viável, pois gera energia elétrica sem consumo adicional de combustível.

A irreversibilidade reduziu de 422,0 kW para 122,0 kW, ou seja 71,1% com a geração de 300 kW. Ou seja, as perdas reduziram de 8,3% da exergia disponível para 2,4%.

Para a empresa que implantou o equipamento a economia de energia por ano é em torno de 2.500 MWh, o que projeta um valor de aproximadamente R\$660.000,00 de redução no custo da energia elétrica ao ano.

Deve-se ressaltar que nos cálculos acima realizados se adotou um Título de vapor saturado de 100%. Esta simplificação pode ser adotada, já que a pressão de vapor saturado na entrada do equipamento apresenta uma pequena perda de carga em relação à pressão de geração de vapor. Ou seja, existe estabilidade de pressão e velocidades compatíveis do vapor saturado nas tubulações.

O valor de investimento para a implantação é comparável ao de uma Pequena Central Hidrelétrica, com a vantagem de apresentar um fator de carga maior, 90% contra 50% a 60% de PCHs, o que demonstra a ser aplicável sob o ponto de vista financeiro.

Concluindo, o Turbo Gerador a Parafuso Helicoidal se apresenta como uma tecnologia simples e de fácil aplicação com resultados motivadores.

## REFERÊNCIAS

- 1 CUADRA, C. T. e CAPILLA, A. V. Curso de Doctorado. Termoeconomia. Dpto. Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza. España. 100p. 2000.
- 2 RODRIGUES, M. L. M. Estudo técnico-econômico da implantação da cogeração em pequena escala a biomassa em uma indústria. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica (Sistemas Térmicos e Fluidos) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 185 p., 2009.
- 3 HD ENERGIA VERDE. Belo Horizonte: Minas Gerais, 2012. Disponível em: <<http://www.hdenergiaverde.com>>. Acesso em: 16 ago. 2012.
- 4 MIELNIK, O. Fundação Getúlio Vargas. Energia elétrica e inovações energéticas. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <[http://fgvprojetos.fgv.br/sites/fgvprojetos.fgv.br/files/PUB\\_ENERGIA%20ELETRICA.pdf](http://fgvprojetos.fgv.br/sites/fgvprojetos.fgv.br/files/PUB_ENERGIA%20ELETRICA.pdf)>. Acesso em 10 abril. 2013.