

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DAS TURBINAS DE FLUXO CRUZADO E FRANCIS EM SISTEMA COM REGULARIZAÇÃO DIÁRIA DE VAZÃO

**Antonio G. de Mello Jr.*
Ildo Luís Sauer****

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo de caso, comparando a performance das turbinas de fluxo cruzado e Francis para uma condição de curva de carga diária variável e uma regularização diária de vazão. A turbina de fluxo cruzado tem uma boa performance nessas condições porque a curva de rendimentos é quase invariante. A regularização da vazão da água pode ser interessante com o uso de um reservatório, acumulando a água requerida para satisfazer a demanda de pico, principalmente quando a vazão requerida no pico é maior que a vazão em regime do sistema. Além das vantagens de custo no caso analisado, a turbina de fluxo cruzado compete favoravelmente com a turbina Francis, apresentando um alto rendimento médio diário.

* Universidade Presbiteriana Mackenzie. E-mail: mellojr@mackenzie.com.br.

** Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo. E-mail: illsauer@iee.usp.br.

Abstract

This work presents a case study, comparing performance of cross flow and Francis type turbines for a condition of daily variable load curve and daily water flow regularization. Cross flow turbines perform well under this condition, because efficiency curve is almost constant with the flow variation. Water flow regularization, with the use of reservoir, may be interesting for accumulation required to satisfy peak demand, specially when the required peak flow is larger than regimen system flow. Beyond cost advantages, in the case analyzed, cross flow turbine competes favorably with the Francis turbine, presenting higher daily average efficiency.

1 INTRODUÇÃO

A universalização do atendimento de energia elétrica em todo o território nacional, principalmente sua extensão às populações mais carentes e isoladas dos sistemas interligados de distribuição, constitui objetivo relevante. A potencial utilização das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), incluindo as micro e minicentraís, para essa finalidade deve ser encarada como um fator indutor da busca de tecnologias que possam ser desenvolvidas no País e que apresentem maior facilidade de fabricação, menores custos e praticidade em termos de operação e manutenção.

Entre países do chamado Primeiro Mundo, como Alemanha e Suíça, e do Terceiro Mundo, como Nepal e Sri Lanka, a turbina de fluxo cruzado, também conhecida como Michell-Banki, Michell-Ossberger ou simplesmente Banki, já vem sendo utilizada de maneira intensa. Alguns países, como o Nepal, através de cooperação com as empresas BYS e BEW, desenvolveram sua própria tecnologia.

Neste trabalho apresentamos uma análise comparativa da utilização da turbina de fluxo cruzado e da turbina Francis, para atendimento à carga elétrica com variação diária típica, em sistema com regularização apenas diária de vazão. Procuramos demonstrar que, além de custo de investimento inferior quando comparado ao da turbina Francis, existem sistemas em que o emprego da turbina de fluxo cruzado se apresenta tecnicamente vantajoso. Isso se deve, de forma fundamental, à sua versatilidade quanto a operar com rendimentos quase invariantes, mesmo sob variações acentuadas de vazão.

2 A UTILIZAÇÃO DA TURBINA DE FLUXO CRUZADO COM VARIAÇÕES DE VAZÃO

Na maioria das aplicações, o campo da turbina de fluxo cruzado coincide com o campo da turbina Francis, conforme mostra Figura 1.

A utilização da turbina de fluxo cruzado, em mini e microcentrais hidrelétricas com variações consideráveis de vazão, pode ser de grande importância principalmente sob os aspectos técnico e econômico.

Uma situação de interesse é a da regularização diária da vazão, compatível com a carga elétrica diária, variável, incluindo pico, cujo atendimento requer variação da vazão, em virtude do rendimento e da carga.

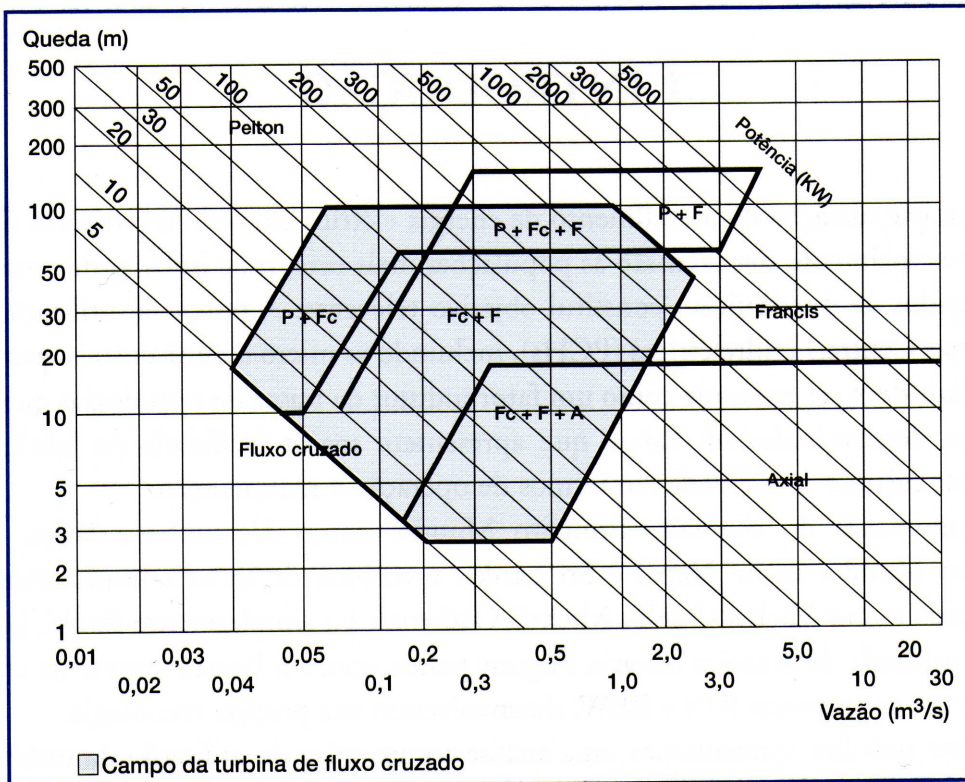


Figura 1 Campo de aplicação dos diversos tipos de turbinas: P = Pelton, F = Francis, Fc = Fluxo cruzado, A = Axial²

Embora a turbina de fluxo cruzado (Figura 2) apresente no ponto de potência nominal um rendimento menor que o da turbina Francis, (Figura 3), conforme pode ser observado na Figura 4, ela apresenta uma curva de rendimento mais estável para variações de vazão. Essa característica torna interessante a análise comparativa da utilização das duas turbinas em uma minicentral que possua regularização diária de vazão.

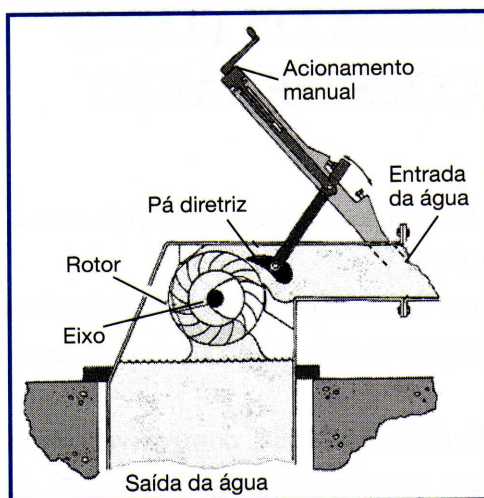


Figura 2 Turbina de fluxo cruzado¹

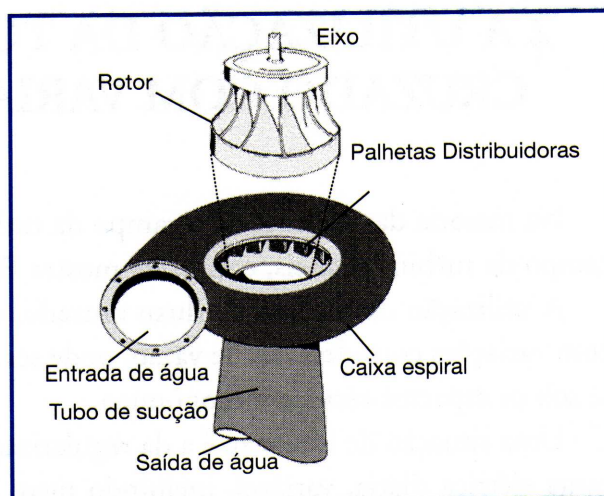


Figura 3 Turbina Francis¹

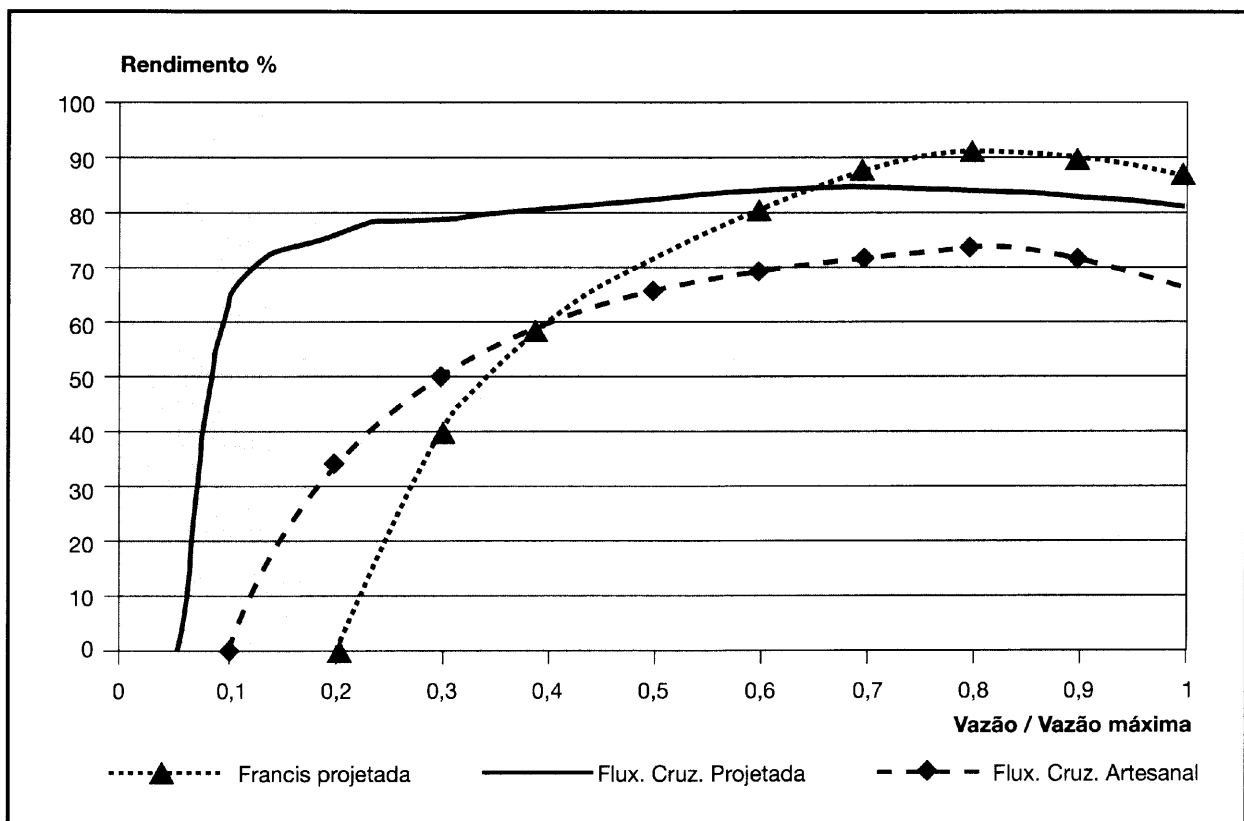


Figura 4 Curvas de rendimentos da turbina de fluxo cruzado e da turbina Francis⁴

2.1 A regularização diária de vazão

Podem ocorrer três situações para o atendimento da ponta da carga diária por uma instalação de mini/microcentral hidrelétrica:

- A vazão de regime é suficiente para atender ao horário de pico e, nesse caso, não se faz necessário um reservatório. A regularização da vazão seria feita por vertedouro e admissão da turbina.
- A vazão de regime não é suficiente para atender ao horário de pico, porém a sobra das vazões fora dos horários de pico, sendo armazenada em reservatório, é suficiente para atender ao horário de pico.
- A vazão de regime e a obra das vazões fora do horário de pico, mesmo que acumuladas, não são suficientes para atenderem ao consumo do horário de pico.

A Portaria nº 109, de 24 de novembro de 1982, do DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – considerava que uma PCH deveria atender, entre outras às seguintes condições:

- a) Operasse a fio d'água ou no máximo com pequena regularização diária.
- b) Fosse provida de barragens e vertedouros com altura máxima de 10 metros.
- c) Possuísse estruturas hidráulicas para vazão turbinável de no máximo 20 m³/s.
- d) Fosse dotada de unidades geradoras com potência individual de até 5 MW.

Em maio de 1984 o governo federal, aprovou o Plano Nacional de Pequenas Centrais Hidrelétricas – (PNPCH) – e o DENAEE, através da Portaria nº 125, de 17 de agosto de 1984, aprovou a Norma nº 4 na qual as PCHs deveriam se enquadrar nas premissas apresentadas anteriormente. O Denae, através da Portaria nº 136, de 6 de outubro de 1987, reduziu a dois os condicionantes: desenvolver potência total igual ou inferior a 10 MW e potência unitária de 5 MW, podendo-se utilizar qualquer técnica de engenharia.

A decisão quanto à necessidade da regularização de vazão, diária ou por outros períodos, principalmente com o uso de uma barragem, depende do comportamento do regime de vazão da bacia, do comportamento da demanda de energia da localidade, e da possibilidade de complementação com outra fonte de energia. O gráfico de carga diária de pequenos povoados isolados corresponde, tipicamente, à curva apresentada na Figura 5.

A curva de carga diária permite equacionar o balanço de energia e água requeridos, e definir a distribuição temporal das vazões para o atendimento da demanda.

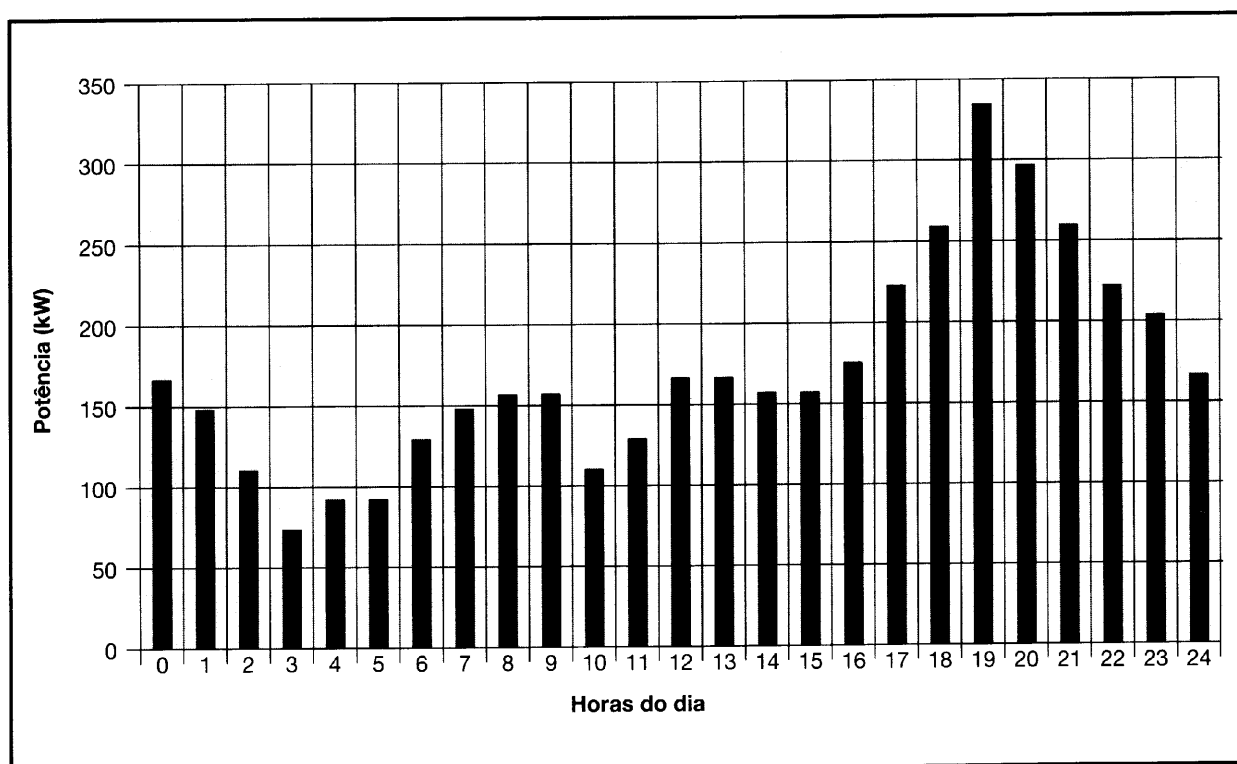


Figura 5 Curva de carga diária típica

O caso analisado neste trabalho adota os seguintes dados e premissas:

- A vazão de regime (conforme recomendado nos manuais da Eletrobrás) é aquela com frequência de 95%, ou seja, a que ocorre em pelo menos 95% de todas as observações de um determinado período; $Q_{95\%} = 1,3 \text{ m}^3/\text{s}$.
- A altura de queda útil deve ser mantida constante e igual a 22m; $H_u = 22\text{m}$.
- O rendimento do gerador deve permanecer constante mesmo com a variação da potência no eixo da turbina; $\eta_g = 92\%$.
- As faixas de vazão e altura são indicadas tanto para a utilização da turbina de fluxo cruzado quanto da turbina Francis, como pode ser observado na Figura 1.
- Os rendimentos das turbinas, η_t , são os indicados no gráfico da Figura 4.

Os dados do caso estudado estão compilados na Tabela 1, incluindo: carga horária, potência turbinada, rendimentos das turbinas, vazão média horária requerida e excedente.

TABELA 1

Distribuição dos rendimentos e vazões de operação e excedente

Potência gerada (kW)	Hora	Potência (kW)	Rendimento (η_t)		Q operação (m^3/s)		Q excedente (m^3/s)	
			Flu.Cruz.	Francis	Flu.Cruz.	Francis	Flu.Cruz.	Francis
147,2	1	160	0,8	0,6	0,9267	1,2356	0,3733	0,0644
110,4	2	120	0,8	0,5	0,69502	1,112	0,60498	0,18796
73,6	3	80	0,78	0,4	0,47523	0,9267	0,82477	0,3733
92	4	100	0,78	0,45	0,59404	1,0297	0,70596	0,27034
92	5	100	0,78	0,45	0,59404	1,0297	0,70596	0,27034
128,8	6	140	0,78	0,55	0,83165	1,1794	0,46835	0,12057
147,2	7	160	0,78	0,6	0,95046	1,2356	0,34954	0,0644
156,4	8	170	0,8	0,6	0,98462	1,3128	0,31538	0,0128
156,4	9	170	0,8	0,6	0,98462	1,3128	0,31538	-0,0128
110,4	10	120	0,78	0,5	0,71284	1,112	0,58716	0,18796
128,8	11	140	0,78	0,55	0,83165	1,1794	0,46835	0,12057
165,6	12	180	0,8	0,65	1,04254	1,2831	0,25746	0,01688
165,6	13	180	0,8	0,65	1,04254	1,2831	0,25746	0,01688
156,4	14	170	0,8	0,6	0,98462	1,3128	0,31538	-0,0128
156,4	15	170	0,8	0,6	0,98462	1,3128	0,31538	-0,0128
174,8	16	190	0,8	0,7	1,10045	1,2577	0,19955	0,04234
211,6	17	230	0,81	0,85	1,31568	1,2538	-0,01568	0,04623
257,6	18	280	0,82	0,9	1,58217	1,4415	-0,28217	-0,1415
331,2	19	360	0,82	0,92	2,03422	1,8131	-0,73422	-0,5131
294,4	20	320	0,82	0,9	1,80819	1,6475	-0,50819	-0,3475
257,6	21	280	0,82	0,9	1,58217	1,4415	-0,28217	-0,1415
220,8	22	240	0,81	0,85	1,37289	1,3083	-0,07289	-0,0083
202,4	23	220	0,81	0,8	1,25848	1,2742	0,04152	0,02579
165,6	24	180	0,8	0,6	1,04254	1,39	0,25746	-0,09

Os valores a seguir foram calculados a partir da Tabela 1, com planilha Excel:

- Energia necessária para atender à curva de carga diária (energia firme)*

$$E_g = 4103,2 \text{ kWh}$$

- O volume total de água disponível com a vazão $Q_{95\%}$ (frequência acumulada)

$$V_t = 112320 \text{ m}^3$$

- O volume total necessário para a turbina Francis atender à carga diária

$$V_F = 110467 \text{ m}^3$$

- Volume total necessário para a turbina de fluxo atender à carga diária

$$V_{fc} = 92635 \text{ m}^3$$

- Vazão adicional necessária para atender a horário de pico com a turbina Francis

$$Q_F = 1,29325 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Vazão adicional necessária para atender a horário de pico com a turbina de fluxo

$$Q_{fc} = 1,8953 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Volume do reservatório para atender a pico de carga com a turbina Francis

$$V_F = 4655,69 \text{ m}^3$$

- Volume do reservatório para atender a pico de carga com turbina de fluxo

$$V_{fc} = 6823,12 \text{ m}^3$$

- Potência necessária para atender a pico da carga diária

$$N_p = 360 \text{ kW}$$

- Máxima vazão necessária no horário de pico com o uso da turbina Francis

$$Q_{\text{máx}F} = 1,8131 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Máxima vazão necessária no horário de pico com a da turbina de Fluxo

$$Q_{\text{máx}fc} = 2,0342 \text{ m}^3/\text{s}$$

* Energia firme é a energia gerada pela vazão firme conseguida seja da regularizada ou não. É a energia garantida para atendimento do sistema.

- Potência instalada da turbina

$$N_i = 360 \text{ kW}$$

Da Tabela 1 podemos também obter outros resultados:

- Potência a fio d'água para turbina Francis (com $Q_{95\%}$)

$$N_F = 258,121 \text{ kW}$$

- Potência a fio d'água para turbina de fluxo cruzado ($Q_{95\%}$)

$$N_{fc} = 230,064 \text{ kW}$$

- Volume vertente ou sobra no caso da turbina Francis

$$V_{vF} = 1853 \text{ m}^3$$

- Volume vertente ou sobra no caso da turbina de fluxo Cruzado

$$V_{vfc} = 19685 \text{ m}^3$$

As Figuras 6 e 7 mostram o comportamento diário das vazões, para as turbinas de fluxo cruzado e Francis, permitindo conclusões importantes quanto à capacidade de geração de energia total por esses dois tipos de turbinas, durante as 24 horas do dia.

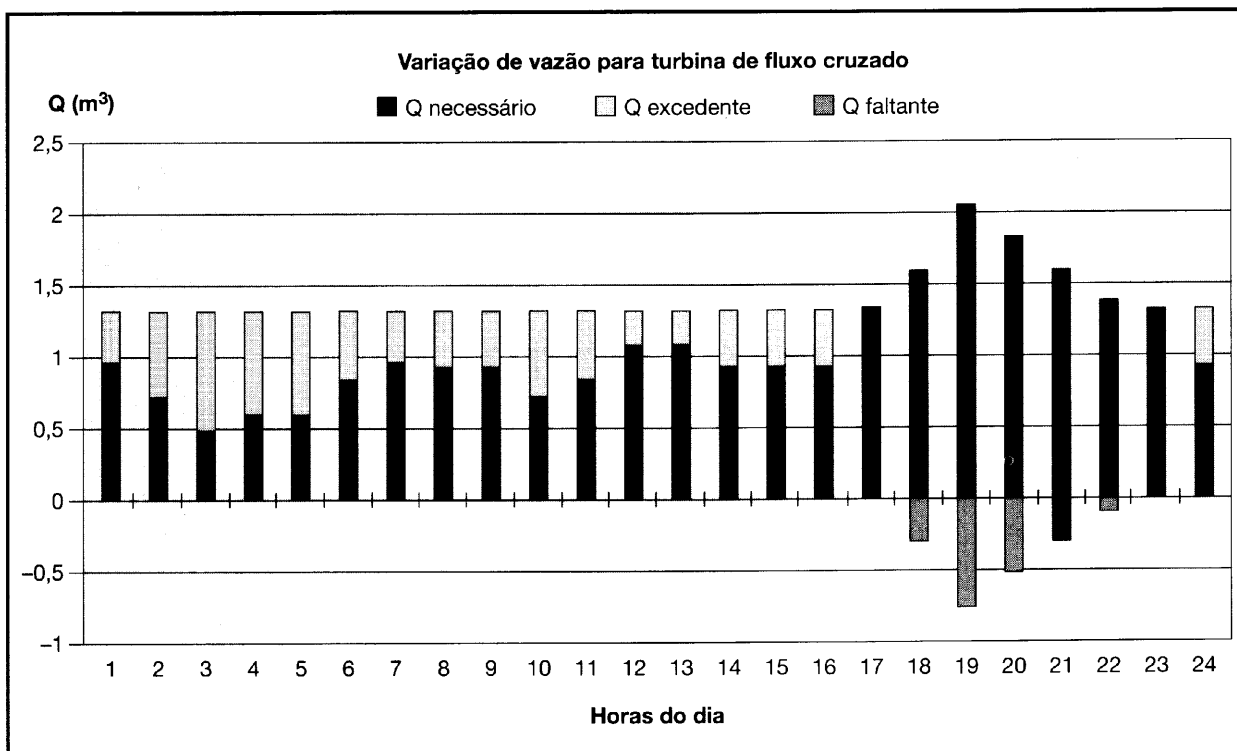


Figura 6 Comportamento diário da vazão para a turbina de fluxo cruzado

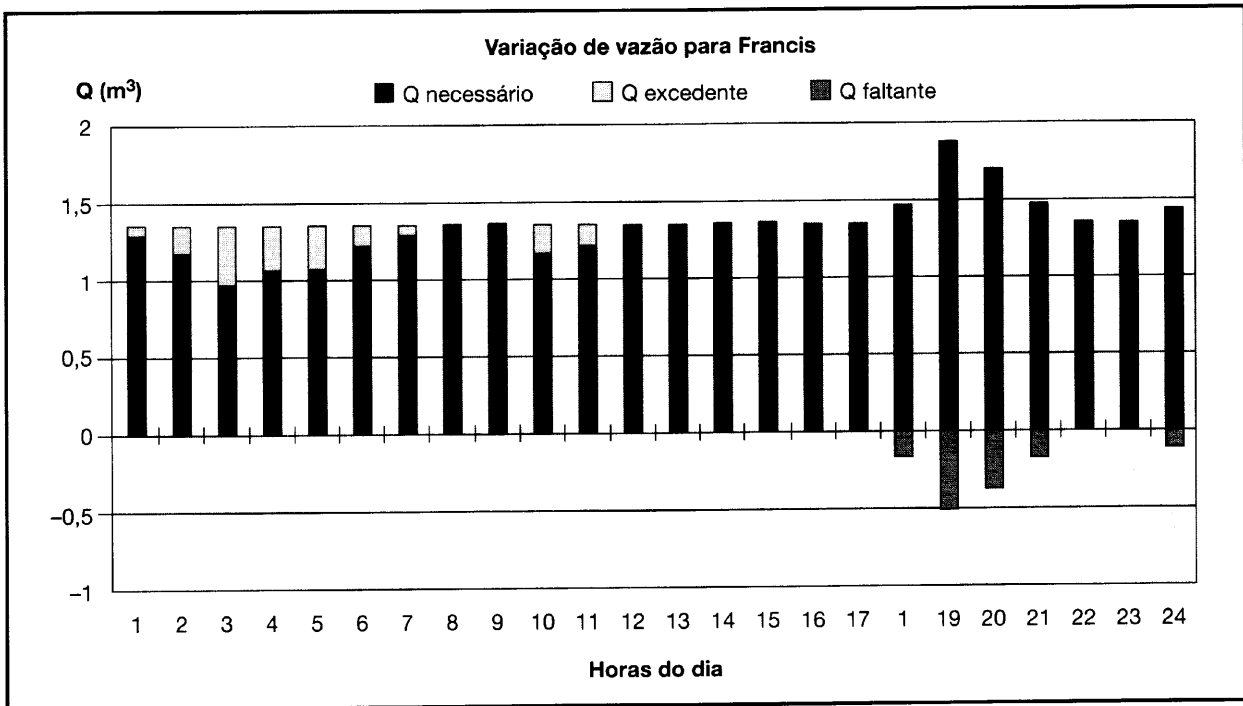


Figura 7 Comportamento diário da vazão para a turbina Francis

3 O FATOR CUSTO

Segundo Meier⁴, o custo para empreendimentos de micro e minicentraís pode variar de US\$ 550 a 2.800 US\$ por kW instalado, dependendo das condições de vazão, altura e obras civis. Ele considera que a participação dos equipamentos deve estar na média de 26,5% do custo total da obra, abaixo dos 40% a 50% geralmente divulgados. E salienta que um custo abaixo de US\$ 1.000 por kW instalado só é possível com tecnologia local.

Nakarmi e outros⁷ apresentam a Figura 8 para comparação para custo de turbinas Francis e de fluxo cruzado.

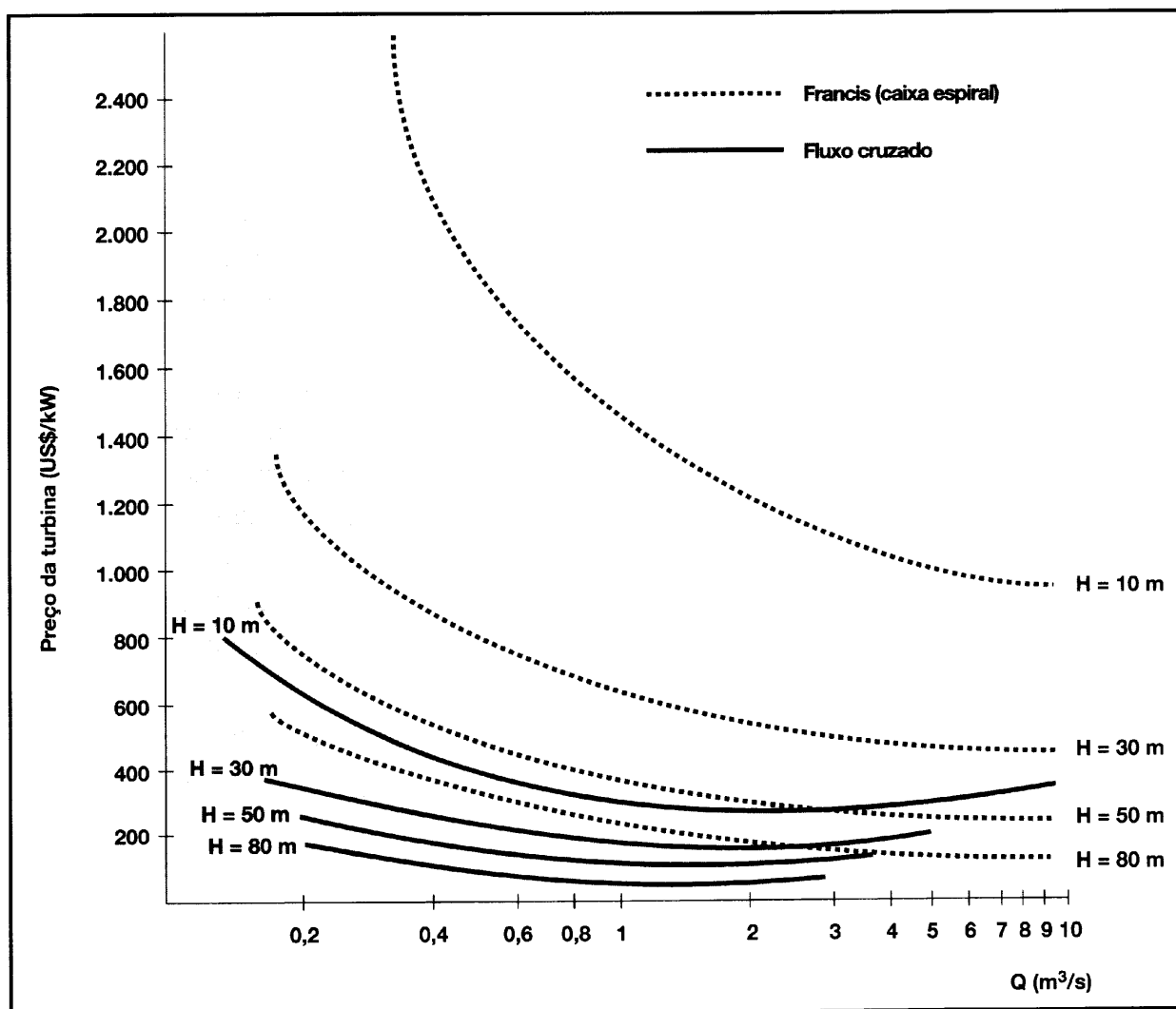


Figura 8 Custo das turbinas Francis e de fluxo cruzado conforme variação da queda e vazão⁷

Harvey e outros¹ mostram o custo comparativo entre diversos tipos de turbinas para mini e microcentrais hidrelétricas conforme a faixa de potência, mostrada na Tabela 2.

TABELA 2

Custo de turbinas em US\$ 1.000 sem gerador e redutor¹

Potência no eixo kW	Fluxo cruzado	Francis
2	1 - 2	4 - 6
5	2 - 6	8 - 10
10	2 - 10	15 - 20
20	3 - 14	20 - 30
50	5 - 30	25 - 70
100	30 - 50	40 - 100
150	50 - 80	60 - 120

4 CONCLUSÕES

- A turbina de fluxo cruzado é recomendada quando se deseja otimizar a energia gerada em situações de grande variação de vazão no sistema, pois a sua correspondente variação de rendimento é bem menor que a da turbina Francis (Figura 4).
- O volume de água a ser armazenado durante o dia para atender à ponta é maior para a turbina de fluxo cruzado quando comparado à Francis, porque no ponto de potência de pico a turbina Francis possui um rendimento maior, necessitando de menor vazão. Isso implica um reservatório de volume maior para turbina de fluxo cruzado (Figuras 6 e 7).
- A vazão total utilizada para mesma geração de energia durante o dia pela turbina de fluxo cruzado é bem menor que a necessária para a Francis gerar a mesma energia.
- O excedente de vazão não utilizada na turbina de fluxo cruzado pode ser aproveitado tendo em vista outras finalidades como: irrigação, saneamento, lazer, limpeza de áreas etc.
- A turbina de fluxo cruzado apresenta uma melhor flexibilidade no que diz respeito ao aproveitamento e variação da vazão. Para enfatizar, se a vazão firme fosse de $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ em vez de $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$, a turbina Francis não poderia atender à curva de carga proposta, enquanto a turbina de fluxo cruzado ainda se adaptaria à nova configuração garantindo a demanda.

REFERÊNCIAS

1. HARVEY A., BROWN, A., HETTIARACHI, P., INVERSIN, A. *Micro hydro design manual – a guide to small scale power schemes*. Londres: IT Publications, reprinted, 1998.
2. HERNÁNDEZ, C. *Estandarización y selección de turbinas para pequeñas hidroeléctricas*, OLADE, Bucaramanga, Colômbia, 1985.
3. JIANDONG, T., NAIBO, Z., XIANHUAN, W., JING, H., HUISHEN, D. *Mini hydro-power*. 1 ed. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
4. MEIER, U. *Local experience with micro – hydro technology*. 3 ed. St. Gallen, Suíça: SKAT Publications, 1985.

5. MELLO JR., A.G. *A turbina de fluxo cruzado (Michell-Banki) como opção para centrais hidráulicas de pequeno porte*. Dissertação (Mestrado) PIPGE – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
6. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, ELETROBRAS, DNAEE. *Manual de mini-centrais hidrelétricas*. Rio de Janeiro, 1985.
7. NAKARMI, K., ARTER, A., WIDMER, R., EISENRING, M. *Cross flow turbine design and equipment engineering*. MHGP series, v. 3, 1993.