

## XI-043 - FATOR DE ROTAÇÃO PARA PROGRAMAÇÃO DE INVERSORES – APLICAÇÃO NA CLP DE COMANDO PARA BOOSTERS E ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO

### **Pedro Alves Silva<sup>(1)</sup>**

Mestre em Engenharia Civil – Modalidade Obras Hidráulicas pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP/USP). Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia Mackenzie. Professor na Fundação Armando Alvares Penteado (FAAP) e Universidade São Judas Tadeu.

### **Alisson Gomes de Moraes<sup>(2)</sup>**

Doutor em Engenharia Civil – Modalidade Obras Hidráulicas pela Escola Politécnica da USP - Universidade de São Paulo, Mestre em Engenharia Civil – Modalidade Obras Hidráulicas pela Escola Politécnica da USP. Engenheiro Civil pela Universidade Nove de Julho e Tecnólogo em Obras Hidráulicas pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP). Engenheiro Civil na SABESP.

### **Francis Valter Pêpe França<sup>(3)</sup>**

Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da USP - Universidade de São Paulo, Mestre em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da USP, Especialista em Engenharia de Saneamento Básico pela Faculdade de Saúde Pública da USP e Graduado em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da UFBA - Universidade Federal da Bahia.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Cravorana, 103 – Jd Pedro Nunes – São Paulo - SP - CEP: 08061-220 - Brasil - Tel: (11) 2037-8647 - e-mail: [lestepas@uol.com.br](mailto:lestepas@uol.com.br)

**Endereço<sup>(2)</sup>:** Avenida do Estado, 561 – Bom Retiro – São Paulo - SP - CEP: 01107-000 - Brasil - Tel: (11) 3388-6603 - e-mail: [agmoraes@sabesp.com.br](mailto:agmoraes@sabesp.com.br)

### **RESUMO**

O controle da vazão e pressão da rede pode ser realizado com base na atuação de um inversor de frequência. Este pode ser programado através de um CLP com os parâmetros e dados de sensores para cada rede específica. Através de medições de campo este trabalho propõe estabelecer limites de rotação para atender os parâmetros mínimos e máximos de pressão. A variação da rotação baseia-se no princípio da equação do polinômio da curva da bomba tendo como base a vazão de consumo de um período de 24 horas. Os resultados obtidos proporcionam a otimização da operação do inversor dentro de uma faixa previamente estabelecida. Ao final são apresentadas recomendações para determinação de fatores de rotação na programação da CLP.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eficiência energética, Eficiência Operacional.

### **INTRODUÇÃO**

O Inversor de frequência é um dispositivo que complementa o painel de comando elétrico das bombas e tem a função de gerenciar a rotação do motor e consequentemente da bomba no sentido de disponibilizar vazão de consumo com pressão ou carga piezométrica controlada, este controle ocorre através da programação do inversor que pode ser diretamente no IHM do inversor por meios de sinais 4 a 20 mA ou pulsos obtidos por transdutores de pressão ou de vazão instalados no barrilete de recalque.

O inversor também pode ser programado através de comandos a partir de uma CLP que armazenará a programação de gerenciamento dos conjuntos elevatórios, a CLP é mais flexível e comporta maior complexidade de programação dos meios de entradas através de transdutores remotos ou por programação em modo local. Existe, também, a condição de programação pela composição de comandos remotos e contorno no modo local.

A proposta do Fator de rotação entra no caso de uso de CLP com sinais de transdutores e limites operacionais controlados por fatores de rotação máximos e mínimos para cada hora do dia de 24 horas, como condição de contorno da programação.

## OBJETIVO

A proposta de programação do inversor de frequência em tempo estendido para estações elevatórias de água de abastecimento público será feita com base na vazão horária “Qh” e na carga de pressão “Hh” necessária para abastecer até o ponto crítico com no mínimo 10 mH<sub>2</sub>O. Usará medições de campo para calcular os parâmetros chamados de Fator de rotação, estes fatores de redução de rotação são proporcionais a frequência elétrica do motor e será afetada na mesma proporção de modo a estabelecer limites mínimos e máximos de frequência de rotação do inversor para disponibilizar pressão suficiente para atender ao abastecimento do sistema com pressão máxima no ponto crítico de 10 mH<sub>2</sub>O.

## MÉTODO

As estações elevatórias com mais de um conjunto, todos devem estar equipados com inversor de frequência. A programação será feita individualmente e o equilíbrio entre as curvas (Polinômios) ocorrerá naturalmente pelo equilíbrio dinâmico das pressões da associação.

## ROTOR E ROTAÇÃO

Se não existir curvas reais dos rotores das bombas, obtidas através de ensaios, basta consultar o Catálogo do fabricante e extrair o polinômio da curva da bomba (o polinômio poderá ser obtido por qualquer processo, eu faço por mínimos quadrados).

Uma forma razoável de obtê-lo será apresentada a seguir, através da Figura 1, que mostra a variação da curva mantendo o rendimento original, e, ao lado o equacionamento do polinômio da curva do rotor H<sub>0</sub>.

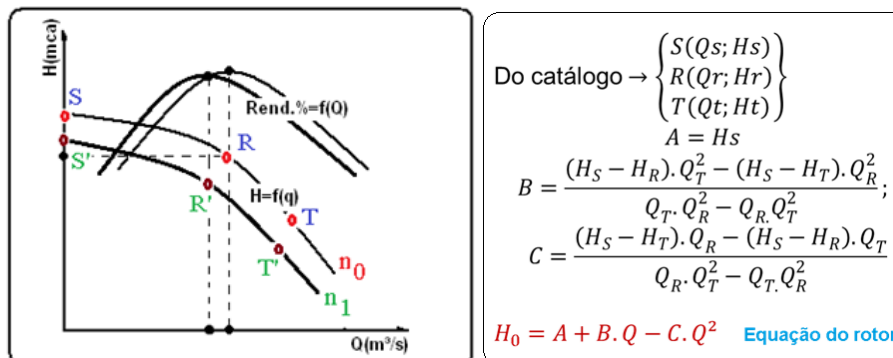


Figura 1 – Representação gráfica do processo de obtenção da equação do polinômio da curva da bomba através do catálogo do fabricante da bomba. (Koelle. E. 1998).

## VAZÃO DE CONSUMO

Será necessário obter a curva da vazão de consumo no período de 24 horas, extrair a vazão mínima e a máxima registradas no período. A variação na rotação precisa variar da máxima vazão até a mínima e retornar a máxima em círculos de 24 horas, fase por fase de uma hora, conforme mostra a Figura 2.

Por isso é necessário obter a vazão individual horária das bombas, se não for possível obtê-la individualmente, deve-se observar se os rotores e as rotações das bombas são iguais ou muito próximas, quanto mais semelhante melhor. Então pode-se dividir a vazão total (medida no trecho de recalque, antes de qualquer derivação), pelo número de bombas em operação na hora da medição. Será necessário obter uma vazão intermediária pertencente a curva de rendimentos semelhantes correspondente ao ponto “A”, para obtê-la aplicasse uma equação de semelhança em “A”: tendo a vazão Q<sub>1</sub> aplica-se na equação do polinômio da curva da bomba H<sub>0</sub> e obtêm-se a carga H<sub>1</sub> correspondente a rotação n<sub>1</sub>.

A partir deste ponto pode-se obter a equação da curva de rendimento semelhante H2, isto é, trazer o rendimento obtido no ponto de trabalho para os demais pontos nas próximas 24 horas. Já se conhece as ordenadas do ponto “1”.

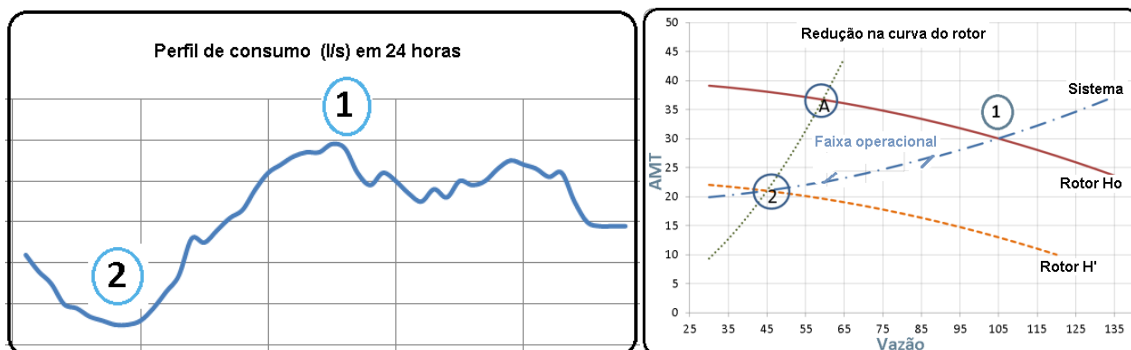


Figura 2 – obtenção da curva de rotação correspondente a vazão mínima

### CÁLCULO DO FATOR DE ROTAÇÃO ( $\alpha$ )

O equacionamento é simples e de fácil desenvolvimento, conforme segue:

$$H_2 = \left[ \frac{H_1}{Q_1^2} \right] \cdot Q_2^2 \quad (1)$$

De posse da equação (1),  $H_2 = f(Q_2)$ , pode-se obter outra equação que se cruza com  $H_2$  no ponto “A”, na intersecção  $H_1=H_0$  quando se aplica a vazão do ponto de trabalho “1” do gráfico da Figura 2.

$$H_1 = A + B \cdot Q + C \cdot Q^2 \quad (2)$$

É preciso observar que se os cálculos estiverem corretos os coeficientes A, B e C da equação (2) entram com seus sinais (positivo ou negativo), onde A deverá ser sempre positivo e B pode mudar de sinal entre positivo e negativo e C será negativo.

No ponto “A” as equações são iguais em vazão e carga, portanto:

$$H_1 = H_2 \quad (3)$$

Da equação (3) obtêm-se uma equação de segundo grau com a vazão  $Q_A$  com coeficientes I, J e K.

$$I \pm J \cdot Q_A - K \cdot Q_A^2 = 0 \quad (4)$$

Deve-se dividir toda equação (4) por “K”, de modo a obter uma nova equação, como segue:

$$1 \pm \left( \frac{J}{K} \right) Q_A - \frac{I}{K} = 0 \quad (5)$$

Da equação (5) obtêm-se a vazão do ponto “A”,  $Q_A$ ; então ao obter a rotação correspondente ao ponto “A” pela equação  $H_1$  e com a vazão  $Q_A$ , quando isto ocorre, pela equação (6) a seguir, a curva  $H_1$  cai para a posição do ponto “2” pela curva de rendimento semelhante com rotação  $n_2$ .

$$n_2 = n_1 \left( \frac{Q_2}{Q_A} \right) \quad (6)$$

Observa-se que n1 corresponde a equação H1 no ponto de trabalho e n2 corresponde a equação (7);

$$H_2 = \alpha^2 \cdot A \pm \alpha \cdot Q_A - C \cdot Q_A^2 \quad (7)$$

Sendo:

$$\alpha = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{fator alfa}) \quad (8)$$

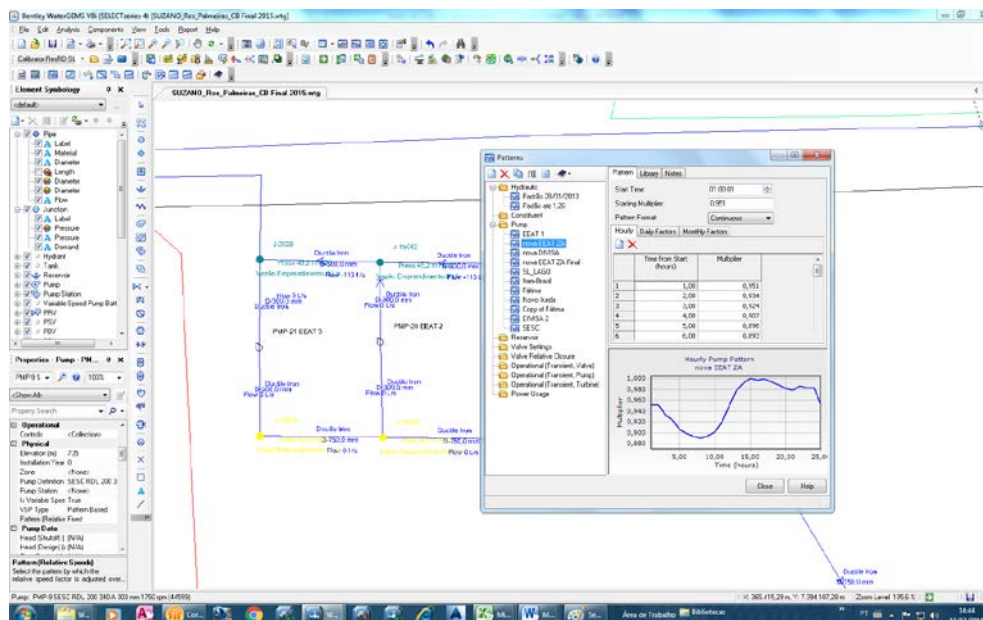
$\alpha$  é um fator de redução ou percentual de redução da rotação **n1** no ponto “2” para se chegar no ponto “1” através da rotação **n2**.

O procedimento para as 24 horas consiste em aplicar para todos os horários com vazão menor que a máxima  $Q_h < Q_{\text{máx}}$ , como sendo a vazão mínima para aquele horário, e, achar o  $\alpha$  correspondente à nova vazão horária ( $Q_h$ ).

Se no Inversor não houver a entrada do fator de redução da rotação, então precisa obter um novo fator de redução para a frequência de rotação. Como é proporcional, o fator de redução da frequência é igual ao fator de redução da rotação.

## RESULTADOS

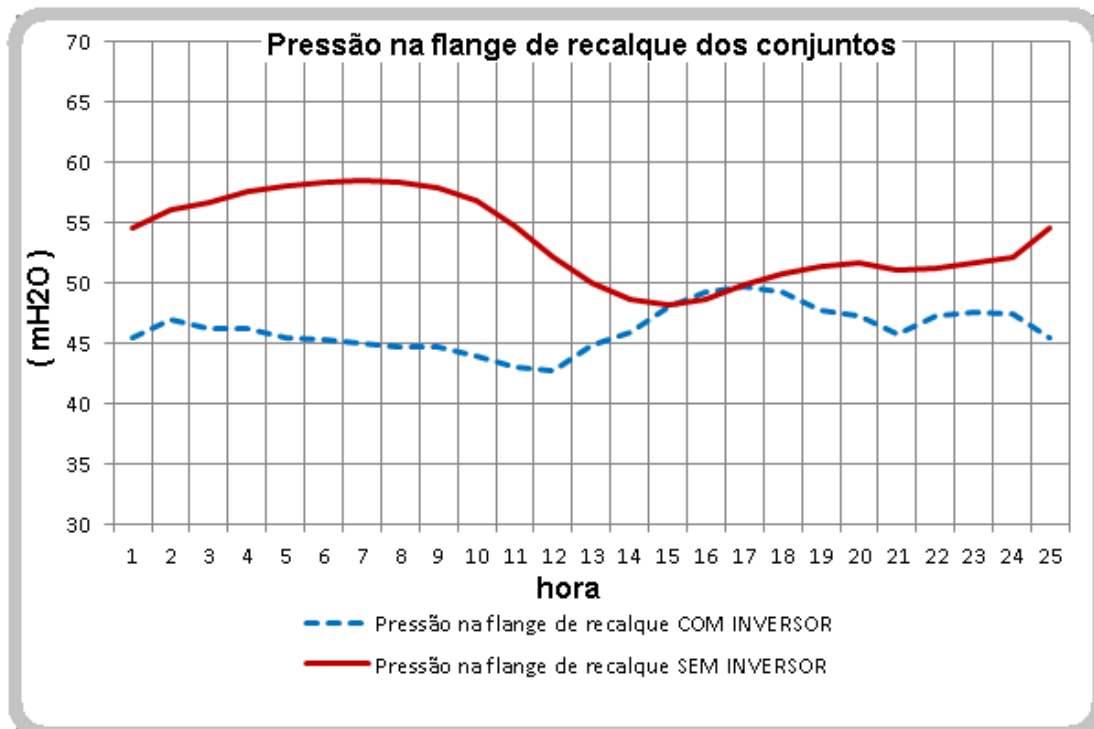
Após inclusão do fator de rotação na programação da CLP, pode-se proceder a nova leitura nos registradores de pressão instalados na Estação elevatória e no ponto Crítico para verificar os resultados. Os resultados abaixo representados foram simulados no Software WaterGEMS Darwin Calibrator da Bentley em modelo aferido com pressões de campo, conforme a Figura 3.



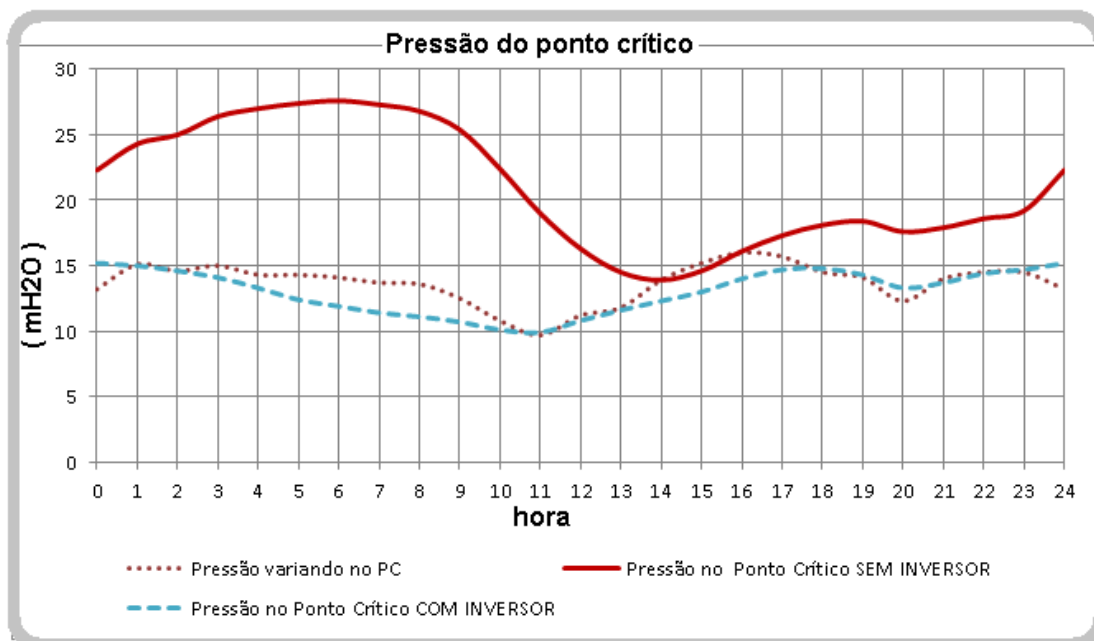
**Figura 3 – Simulação da operação com inversor através do Software Bentley WaterGEMS Darwin Calibrator.**

Os resultados obtidos estão representados nos Gráficos 2 e 3 que mostram as pressões com e sem inversor operando com fator de redução.

O Gráfico 1 mostra a pressão registrada na frange de recalque dos conjuntos em operação com e sem atuação do inversor.



**Gráfico 2 – Pressão na flange de recalque dos conjuntos com e sem inversor.**



**Gráfico 3 – Pressão no ponto crítico com e sem inversor.**

Os resultados obtidos proporcionam a otimização da operação do inversor dentro de uma faixa previamente estabelecida (simulação de um transdutor no ponto crítico) com base nas vazões médias registradas nas séries históricas do Setor de abastecimento, desta se estabelece uma previsão de operação, fora dela indicará anomalias no sistema de distribuição, rompimento de redes ou obstrução.

## CONCLUSÃO

Então para qualquer vazão horária obtida por um conjunto motor-bomba com rotação na frequência de 60 Hz, a variação na frequência do inversor será obtida por:

$$f_i = \alpha_i \cdot 60 \text{ Hz. (} i = 1, 2, 3, \dots, 24 \text{ horas - incrementos)} \quad (9)$$

## RECOMENDAÇÃO

Os fatores devem entrar na programação da CLP como atribuição de valores de uma variável “VAR”, por sua vez esta variável deverá estar programada com a frequência máxima nominal do motor vezes um fator, que em sua fórmula tem-se: VAR = 60 \*, (no formato #,##), para motores de 60 Hz.

OBS.: Para calcular o Fator São necessários dados do sistema de abastecimento:

Medições de campo

1. Cota do eixo da bomba;
2. Cota do ponto crítico PC;
3. Rotação nominal da bomba (atual correspondente a corrente nominal do motor);
4. Pressão nos flanges de sucção e de recalque das bombas (registro horário);
5. Pressão do ponto crítico PC (registro horário)
6. Vazão horária mínima do período de 24 horas dia de menor consumo ou de baixo consumo;
7. Vazão horária ou a vazão máxima do horário de máximo consumo (registro pontual).

Todas as medições deverão ocorrer simultaneamente.

São basicamente as informações para entrar na planilha Excel anexa que procederá aos cálculos para obter o fator de redução. A Tabela 1 é muito extensa para ser apresentado no formato A4 retrato, mas ampliando o visualizador do PDF será possível ler com clareza, está aqui representada só para efeito ilustrativo do processo de cálculo, cujo resultado será representado no Gráfico 1.

**Tabela 1 – Cálculo do fator de rotação frequência.**

Fator de variação na rotação para inversor de frequência																							
C =		B =		A =		-967		H = c + b.O + a.Q² ->		Curva do rotor em operação													
hora	Qmin logger	Qmáx Pto.Trab. logger	rpm nominal	N2 Cota PCx0 fixo	N1 Cota eixo bomba.	Pr.sucção horária logger	He	Ci cota piez.Rec Clasflog	K Caract. Tub.	H2 C.Sist	HA Seme.	C	B	A	c	b	a	Q'	Q''	α			
1	0,0797	0,115	1750	830	784	4	42	836	839	9	680,5793	46,32519	7288,841	57	11,5	-8255,84	-0,0069	-0,00189295	1	0,083791	-0,0824	0,951442	
2	0,0694	0,115556	1750	830	784	4	42	839	841	11	823,7732	45,8779	9745,736	57	11,5	-10712,7	-0,0052	-0,00179489	1	0,073402	67,45189	0,933709	
3	0,0639	0,115556	1750	830	784	4	42	840	841	11	823,7732	45,87447	11119,39	57	11,5	-12899,4	-0,00472	-0,00095196	1	0,065168	71,65996	0,923874	
4	0,0599	0,115556	1750	830	784	4	42	842	842	12	898,6617	44,60972	15361,41	57	11,5	-16328,4	-0,00349	-0,00070429	1	0,059437	83,39175	0,906662	
5	0,0481	0,115556	1750	830	784	4	42	842	843	13	973,5502	44,24025	19160,59	57	11,5	-20127,6	-0,00283	-0,00057135	1	0,053502	93,64113	0,898195	
6	0,0450	0,115556	1750	830	784	4	42	843	843	13	973,5502	43,97144	21714,29	57	11,5	-22681,3	-0,00251	-0,00050709	1	0,050985	98,3739	0,893126	
7	0,0431	0,115556	1750	830	784	4	42	843	843	13	973,5502	43,80475	23629,95	57	11,5	-24596,9	-0,00232	-0,00046754	1	0,048373	102,464	0,890608	
8	0,0456	0,115556	1750	830	784	4	42	842	843	13	973,5502	44,02042	21211,5	57	11,5	-22178,5	-0,00237	-0,00051852	1	0,050956	97,2713	0,894024	
9	0,0500	0,115556	1750	830	784	4	42	842	843	13	973,5502	44,43388	17773,55	57	11,5	-18740,6	-0,00304	-0,00061364	1	0,055456	89,3747	0,901587	
10	0,0611	0,115556	1750	830	784	4	42	841	842	12	898,6617	45,35611	12144,94	57	11,5	-13111,9	-0,00435	-0,00087706	1	0,066379	74,67661	0,920272	
11	0,0789	0,115556	1750	830	784	4	42	838	839	9	673,9963	46,19459	7422,637	57	11,5	-8389,66	-0,00679	-0,00137074	1	0,083114	59,63492	0,94916	
12	0,0953	0,115556	1750	830	784	4	42	834	837	7	524,7153	46,79879	5150,863	57	11,5	-6117,86	-0,00992	-0,00187974	1	0,097469	50,85232	0,977519	
13	0,1064	0,115556	1750	830	784	4	42	832	835	5	374,4424	46,23816	4085,15	57	11,5	-5852,15	-0,01138	-0,00227626	1	0,107361	46,16222	0,999331	
14	0,1193	0,115556	1750	830	784	4	42	830	834	4	259,5529	45,8476	3549,48	57	11,5	-4536,45	-0,01256	-0,00255002	1	0,113268	43,72068	0,999895	
15	0,1156	0,115556	1750	830	784	4	42	829	833	3	224,6454	44,99998	3370,006	57	11,5	-4337,01	-0,01314	-0,0026516	1	0,115973	42,7378	0,996382	
16	0,1131	0,115556	1750	830	784	4	42	830	834	4	259,5535	45,82877	3585,538	57	11,5	-4552,54	-0,01252	-0,00252686	1	0,113165	43,79001	0,999302	
17	0,1075	0,115556	1750	830	784	4	42	831	835	5	374,4424	46,32715	4008,839	57	11,5	-4975,84	-0,01146	-0,00231117	1	0,108152	45,81248	0,999608	
18	0,1025	0,115556	1750	830	784	4	42	832	836	6	449,3309	46,72078	4446,951	57	11,5	-5413,95	-0,01053	-0,00212414	1	0,103675	47,80811	0,998662	
19	0,0994	0,115556	1750	830	784	4	42	833	836	6	449,3309	46,44352	4636,389	57	11,5	-5663,39	-0,01006	-0,00203059	1	0,101343	48,90831	0,981265	
20	0,0983	0,115556	1750	830	784	4	42	834	836	6	449,3309	46,34478	4792,91	57	11,5	-5759,91	-0,0099	-0,00198656	1	0,100482	49,32752	0,978618	
21	0,1014	0,115556	1750	830	784	4	42	832	836	6	449,3309	46,10999	4535,051	57	11,5	-5502,05	-0,01036	-0,00209013	1	0,102833	48,19953	0,985953	
22	0,1003	0,115556	1750	830	784	4	42	833	836	6	449,3309	46,51831	4626,094	57	11,5	-5593,09	-0,01019	-0,00209611	1	0,101984	48,60076	0,989285	
23	0,0972	0,115556	1750	830	784	4	42	834	837	7	524,7153	46,95001	4967,648	57	11,5	-5934,65	-0,0096	-0,00193777	1	0,098777	50,07761	0,982779	
24	0,0944	0,115556	1750	830	784	4	42	835	837	7	524,7153	46,67991	5232,87	57	11,5	-6199,87	-0,00919	-0,00185488	1	0,096016	51,19532	0,979505	
25	0,0797	0,115556	1750	830	784	4	42	838	839	9	673,9963	46,28367	7282,308	57	11,5	-8248,31	-0,00681	-0,00189486	1	0,083824	59,12881	0,951862	

O resultado final representado no Gráfico 1, na verdade calcula um ponto da curva de semelhança mecânica para cada vazão horária inferior a vazão máxima registrada no período de 24 horas, o fator de rotação busca ajustar a frequência do inversor tal que ao varia a vazão a pressão do ponto crítico seja ajustada hora à hora para 10 mH2O.

Se houver variação na pressão de sucção e na vazão de consumo. Esta variação afetará a pressão do ponto crítico por consequência de mudanças na curva do sistema por consequências da mudança na altura estática da curva do sistema e em função da variação da perda de carga, com isto ocorrerá variação na pressão do ponto

crítico. Estas variações de pressão serão corrigidas pelo fator de rotação e frequência quando programado na CLP do painel de comando dos conjuntos motor-bomba da Estação elevatória ou Booster do modo a manter a pressão constante em 10 mH<sub>2</sub>O.

O resultado dos cálculos está representado no Gráfico 1 onde se observa o fator  $\alpha$  (alfa) igual a 1 para a vazão máxima registrada as 13 horas, nos demais horários a rotação estará sempre a baixo da rotação nominal do motor, variando e reduzindo o consumo de energia elétrica.

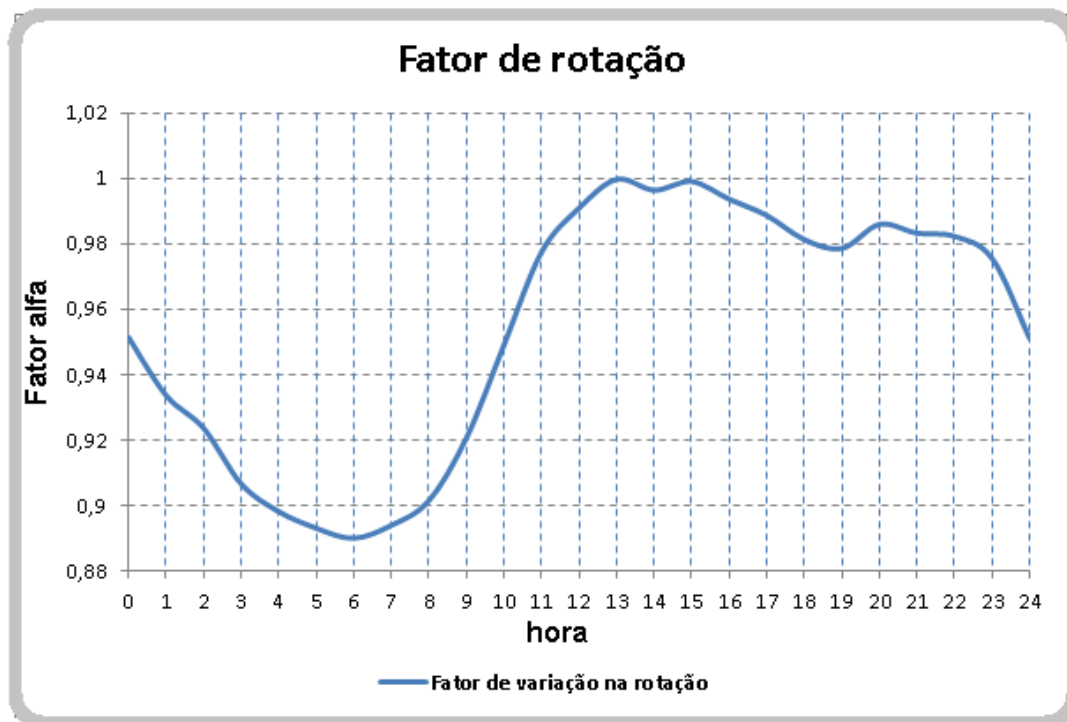


Gráfico 1 – Fator de rotação

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT.
2. MACINTYRE, A. J. Bombas e Instalações de Bombeamento 4.<sup>a</sup> edição. Rio de Janeiro LTC – Livros técnicos e Científicos - Editora S.A. 1997.
3. KOELLE E., Educação continuada em engenharia hidromecânica. Gestão, Projeto e Operação de