

**VII SEMINÁRIO NACIONAL DE  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

Promoção:



INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
BAHIA

---

**8 a 10 de novembro de 2011 - Salvador, Bahia, Brasil.**

---

**Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes: sistema de controle e monitoramento.**

**AUTORES: Antonio S. Sánchez\*, Ana Claudia Oliveira da Silva\*\* e Ricardo Kalid\***

\*Programa em Engenharia Industrial da Escola Politécnica da UFBA

\*\* LABEFEA - UFBA

**GRUPO: A**

**TEMA:** Automação Predial

**PALAVRAS-CHAVE:** controle vazão, automação, eficiência energética.

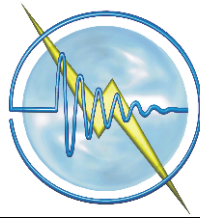
**KEYWORDS:** flow control, automation, energetic efficiency.

**RESUMO:** A automação e o controle de processos oferecem interessantes oportunidades de eficiência energética. Este artigo visa descrever o esquema de controle da planta automatizada de bombeamento do Laboratório de Eficiência Energética e Ambiental (LABEFEA) da UFBA, assim como experiências e simulações que nela podem ser realizadas. Será detalhada uma destas experiências: um estudo comparativo entre os três principais métodos de controle de vazão.

Serão apresentados os elementos que compõem o sistema, com ênfase na área de sensores, automação, controle e no esquema de conexões entre os elementos.

**ABSTRACT:** Automation and process control offers interesting opportunities for energy efficiency. This article aims to describe the control scheme of the automated pumping plant, located at the Laboratory of Energy and Environmental Efficiency (LABEFEA) of the UFBA, as well as some experiments and simulations that can be performed in this plant. One of these experiments will be detailed: a comparative study between the three main methods of flow control.

The components that make up the system will be presented, emphasizing the area of sensors, automation control scheme and the connections between the elements.



## INTRODUÇÃO

A planta de bombeamento do Laboratório de Eficiência Energética e Ambiental (LABEFEA) da UFBA, localizada na Escola Politécnica, consta de um conjunto de quatro motobombas que transferem água entre dois reservatórios. A planta recebe o nome de “Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes” e foi instalada em 2006. O conjunto está automatizado e dotado de sensores e transmissores de vazão, nível, pressão, e de válvulas de controle pneumáticas.

A informação em tempo real é transmitida a um computador com software de supervisão e controle (Ellipse Scada), que permite selecionar e associar as bombas e variar sua pressão de descarga e sua vazão manipulando a rotação dos motores (com conversores de frequência) ou mediante válvulas pneumáticas e bypass.

## DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DA PLANTA

O sistema elevatório compõe-se dos seguintes elementos:

- Dois reservatórios de água com volumes de 1 m<sup>3</sup> cada, situados a uma diferença de cota de 6 m de altura, e interligados por tubulações de sucção e de recalque.
- Conjunto moto-bomba (4 bombas centrífugas acionadas por 2 motores convencionais e 2 motores de alto rendimento). O sistema permite combinações de duas bombas em série ou paralelo, mediante válvulas de controle

A interface gráfica permite visualizar o processo e os valores dos parâmetros em tempo real.

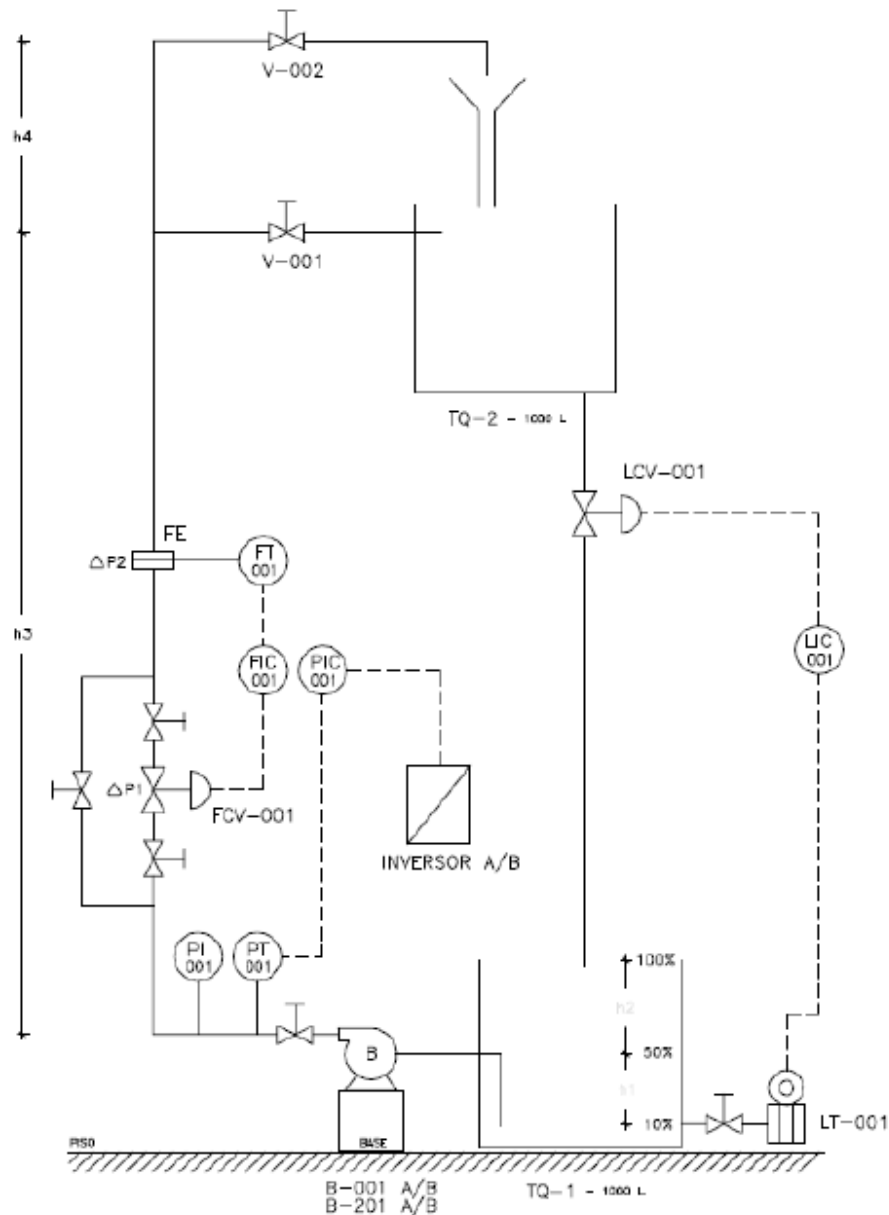
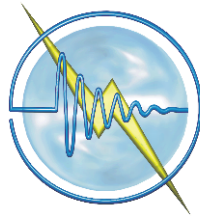
Além do caráter demonstrativo da planta na área de automação e controle, outras experiências que podem ser realizadas com este equipamento são o traçado de curvas de bombas e diversas medidas de eficiência energética: variação da rotação até o ponto de máxima eficiência do motor, desligamento das bombas no horário de ponta, avaliação do consumo de motores de alto rendimento e otimização de processos de bombeamento minimizando perdas de carga e consumo de energia elétrica. A experiência reportada neste artigo será o estudo comparativo do controle da vazão mediante válvulas vs. controle mediante conversores de frequência (que se mostra mais eficiente ao evitar as perdas de carga das válvulas).

manuais.

- Dois conversores de frequência e duas soft-starters para o acionamento das motobombas.

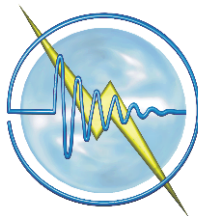
Os sensores e transmissores de nível, pressão e vazão situados na planta (ver Layout na Fig.1) fornecem os sinais de entrada de um CLP onde está configurado o controle PID:

- Da pressão de descarga das bombas, manipulando a rotação dos motores mediante conversores de frequência.
- Da vazão das motobombas, manipulando uma válvula pneumática.
- Do nível dos depósitos, mediante uma segunda válvula pneumática.



– Fig.1 -: Layout da Planta de Bombeamento –

Sensor de nível (por diferencial de pressão) com transmissor no tanque inferior (LT-001). Sensor e transmissor de vazão na descarga do conjunto motobomba (FT-001). Sensor e transmissor de pressão na descarga do conjunto motobomba (PT-001). Duas válvulas de controle pneumáticas: uma para controle de vazão de recalque (FCV-001) e outra para controle do nível do tanque inferior (LCV-001). Um compressor externo pressuriza o circuito de ar comprimido que aciona as válvulas pneumáticas.



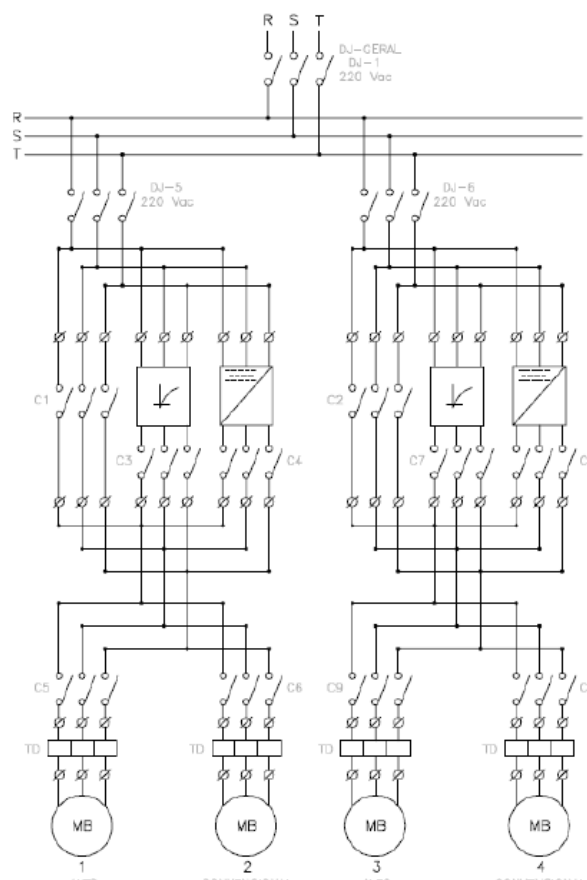
Os transmissores de pressão, vazão e nível são da marca Smar, série LD300, e medem a pressão diferencial entre os lados de alta e de baixa do transmissor (a vazão é obtida pela função raiz quadrada da pressão), emitindo um sinal de 4-20 mA.

Cada válvula pneumática conta com um posicionador digital Smar FY300 que usa um microprocessador para executar o posicionamento exato e rápido da válvula, e um atuador cilíndrico.

O CLP Toshiba, além de atuar no sistema mediante os conversores de frequência e as válvulas pneumáticas, manda as leituras dos sensores para seu display na tela do computador, onde mediante um software de controle (interface de visualização de processo) o usuário pode configurar os valores desejados de nível, pressão e vazão. Mediante este software (Eclipse Scada) é possível também selecionar quais as bombas a serem ligadas, e o modo de acionamento: partida direta, soft-starter ou mediante conversores de frequência.

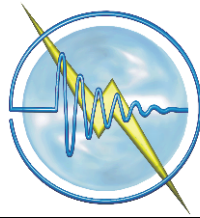
Só podem ser ligadas duas bombas ao mesmo tempo, as quais podem ser configuradas em série ou paralelo mediante válvulas manuais.

Os parâmetros elétricos do sistema (corrente de partida, potência consumida, harmônicos, etc) são medidos com um analisador de energia (Embrasul RE6000) conectado ao painel elétrico de controle, cujo diagrama de comando é mostrado na Fig. 2.:



- Fig.2-: Diagrama de comando elétrico dos motores das bombas. Os motores podem ser acionados por partida direta, soft-starter ou mediante conversores de frequência. -

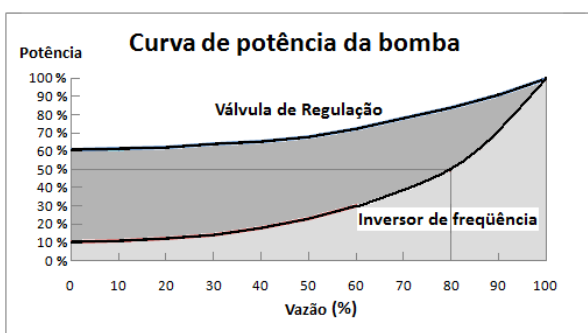
Este sistema admite controle remoto mediante ethernet. O CLP pode ser programado para bombear de acordo com os níveis dos reservatórios ou seguindo um programa pré-estabelecido (p.e. aumentar a vazão nas horas de maior consumo de água e desligar automaticamente no horário de pico da tarifa elétrica).



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, será apresentado um estudo comparativo do consumo de energia na planta de bombeamento ao usar três métodos de controle da vazão: válvula de restrição pneumática, controle mediante conversores e controle mediante by-pass.

A regulação da vazão mediante conversores de frequência (comumente chamados inversores de frequência) em bombas, ventiladores e compressores apresenta várias vantagens. As principais são: proteção do motor graças à partida suave ou *efeito soft-starter* (que evita os picos de corrente na partida do motor, alongando sua vida útil) e economia de energia elétrica, pois não gera perdas de carga na linha. A potência consumida é o 50% ao descer a rotação até o 80% da nominal. A curva teórica de potência consumida da bomba ao variar a vazão é tipicamente (Fig. 3) :



–Fig. 3 –: economia teórica de energia ao regular a vazão mediante um conversor de frequência, segundo Franchi, 2009. (Curvas teóricas de potência consumida) –

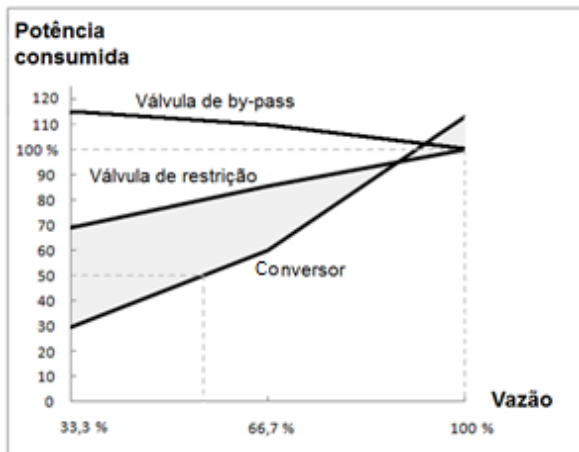
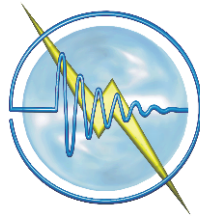
No controle da vazão mediante conversores, a frequência é ajustada e com ela a rotação dos motores (eq. 1). Para uma nova  $N_2 < N_1$  a vazão diminuirá proporcionalmente com a rotação (eq. 2), enquanto a potência diminuirá com o cubo da mesma (eq. 3).

$$N = \frac{120f}{\text{numero de pólos}} \quad (1)$$

$$\frac{Q_1}{N_1} = \frac{Q_2}{N_2} \quad \text{Relação vazão x rotação} \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{N_1^3} = \frac{P_2}{N_2^3} \quad \text{Relação potência x rotação} \quad (3)$$

Na Fig. 4, que mostra os resultados da experiência na planta, percebe-se que a economia mediante o uso de conversores resulta menor que a esperada: a potência só caiu até o 80% ao diminuir a vazão até o 80% da inicial. No entanto, foi realizada outra experiência no mesmo laboratório, onde existe um túnel de vento acionado por um ventilador. Ao diminuir a rotação desse ventilador até o 80% da nominal (variando a frequência de 60 Hz até 48 Hz), a potência consumida desceu até exatamente o 50% da inicial.



– Fig. 4 –: curva real do sistema LABEFEA. Potência consumida para cada um dos três métodos de regulação da vazão

O método de redução da vazão mediante válvula de restrição gera pressões elevadas na descarga da bomba que acabam danificando o sistema de selagem e gerando prejuízos com manutenção. Para solucionar este problema existe outro método de controle de vazão; consiste em utilizar uma válvula de by-pass na saída da bomba para o reservatório de sucção (Lago, R., 2010).

Nota-se na Fig. 4 que o controle com by-pass apresenta um maior consumo energético.

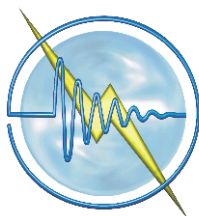
Na experiência ilustrada na Fig. 4, parte-se de uma vazão inicial de 3,2 m<sup>3</sup>/h e uma potência consumida de 420 W. A vazão é reduzida até 1 m<sup>3</sup>/h (31% da inicial) por meio dos três métodos comentados. A potência e a pressão são medidas para quatro vazões diferentes com o objetivo de comparar estes métodos.

Para uma baixa vazão, a regulação mediante conversor de frequência apresenta maior consumo do que a regulação com válvula. O motivo é que em vazões elevadas, a válvula de restrição faria o controle com grande abertura, ou seja, baixa perda de carga, enquanto o conversor gera harmônicos de tensão que reduzem o rendimento do motor (14% de consumo a mais devido à forma não senoidal da onda). A partir de uma vazão de 90% da nominal compensa o uso do conversor.

Os dados numéricos que foram usados na construção da Figura 4 (curvas de potência consumida vs. vazão) são apresentados nas seguintes tabelas (Tabelas 1 e 2). Estas medições foram realizadas por Ramón Lago no LABEFEA (*Eficiência Energética em Processos de Bombeamento*, 2010) usando as leituras dos sensores de pressão e vazão da planta e o analisador de energia Embrasul RE6000.

A incerteza padrão relativa dos instrumentos de medida é:

- 0,04% na medição de potência (Embrasul RE6000)
- 0,04% na medição de pressão e vazão (Smar LD300)



– Tabela 1 : Regulação da vazão: válvula de restrição vs. válvula de by-pass –

Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Válvula de Restrição		Válvula de by-pass	
	Potência elétrica (W)	Pressão na descarga da bomba (kgf/cm <sup>2</sup> )	Potência elétrica (W)	Pressão na descarga da bomba (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	294	1,60	488	0,53
2	364	1,38	470	0,63
3	425	1,08	430	0,79
3,2	420	0,83	420	0,83

– Tabela 2 : Regulação da vazão: válvula de restrição vs. conversor de frequência –

Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Válvula de Restrição		Inversor de frequência	
	Potência elétrica (W)	Pressão na descarga da bomba (kgf/cm <sup>2</sup> )	Potência elétrica (W)	Pressão na descarga da bomba (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	294	1,60	125	40
2	364	1,38	255	50
3	425	1,08	420	60
3,2	420	0,83	480	62

## CONCLUSÃO

Foi comprovada a economia de energia ao regular a vazão mediante o uso de conversores de frequência.

O controle PID da vazão, mediante sensores de diferencial de pressão, mostrou-se eficaz atuando conjuntamente com os conversores de frequência.

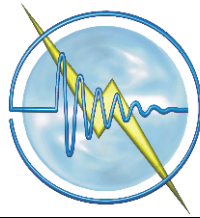
Além de sistemas de recalque e distribuição de água, um sistema de controle como o descrito teria utilidade para sistemas de ventilação e ar condicionado centralizado (linhas de água gelada com chillers e torres de resfriamento), nos quais é interessante a capacidade de selecionar o número de motores a serem ligados e de controlar sua rotação para adequar a capacidade do sistema à demanda existente.

O uso de CLP com possibilidade de controle remoto via ethernet, em conjunto com conversores de frequência, oferece um grande potencial de eficiência energética a estes sistemas.

Contudo o uso de conversores de frequência tem limitações, tais como, injeção de harmônicos na rede elétrica, maior investimento inicial; nos próximos trabalhos essas e outras limitações serão consideradas.

Outro aspecto que deve ser mais explorado é o impacto da incerteza de medição sobre os sistemas de controle.





## **AGRADECIMENTOS**

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa concedida e ao PROTEC-PEI (Grupo de Pesquisa em Tecnologia e Processo do Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial da UFBA) pelo apoio técnico-científico e pela cessão da infra-estrutura necessária ao desenvolvimento da pesquisa. Os autores também querem agradecer à equipe do Laboratório de Eficiência Energética e Ambiental da UFBA (LABEFEA) pela colaboração e apoio.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] Lago R., Ramón. (2010). Eficiência Energética em Processos de Bombeamento d'Água, páginas 52 – 61.
- [2] Franchi, Claiton Moro. (2009)  
Conversores de Frequência: Teoria e Aplicações.
- [3] Gomes, Heber Pimentel (2009)  
Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética.
- [4] Franchi, Claiton Moro ; Camargo, Valter L.A. de. (2008)  
Controladores Lógicos Programáveis – Sistemas Discretos.
- [5] Karassik, Igor J. et al. (2001) The Pump Handbook, McGraw Hill(3<sup>era</sup> edição).
- [6] Dados técnicos dos produtos Smar e Embrasul disponíveis em [www.smar.com.br](http://www.smar.com.br) e em [www.embrasul.com.br](http://www.embrasul.com.br)