

ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE CONVERSORES DE FREQUENCIA EM ELEVATÓRIAS DE ADUÇÃO: PROJETO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EEA FRANÇA PINTO

RESUMO

A busca pelo ponto ótimo de operação é uma necessidade constante que traz vantagens técnicas e redução de custos. A utilização de dispositivos que permitam a variação da velocidade do eixo do rotor de um conjunto motobomba já é uma tecnologia conhecida e utilizada nos sistemas de abastecimento, principalmente em elevatórias de zona alta, que permite o ajuste fino, frente a variação de consumo horário de abastecimento. Nas elevatórias de adução em sistemas integrados, sua utilização ainda é pequena e quando existente, poucas utilizam-se de variação de velocidade do rotor. No ano de 2017, a EEA França Pinto passou por um processo de substituição dos conjuntos motobombas e painéis de proteção, com incremento no desempenho energético da estação. Os novos equipamentos com melhor desempenho energético já reduziram o consumo específico da elevatória, porém, os conversores de frequência lá instalados, permitiram uma otimização do desempenho energético.

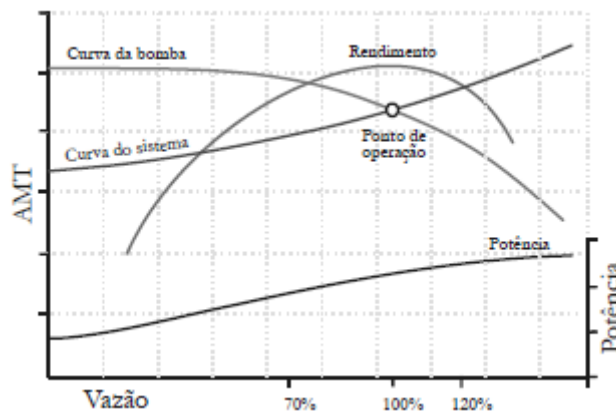
PALAVRAS CHAVES

Otimização, elevatória, energia

INTRODUÇÃO

A bomba centrífuga é o equipamento utilizado para transportar líquidos no saneamento básico, na irrigação rural, na indústria, e prédios comerciais e residenciais. A escolha é feita essencialmente através da determinação da vazão e da altura manométrica (AMT). As curvas características relacionam vazão, AMT e potência absorvida. O ponto de operação é determinado pelo cruzamento das curvas de vazão versus AMT e do sistema, conforme figura 1.

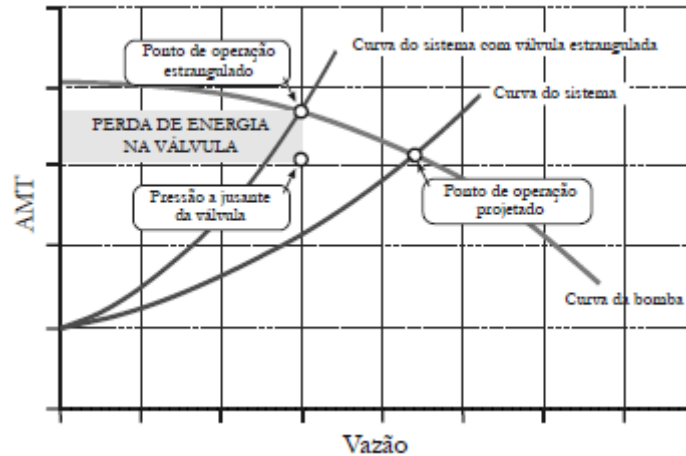
Figura 1: Curvas características de bomba



Determinados sistemas de bombeamento requerem um maior controle de vazão e pressão principalmente quando a variação significativa de demanda de consumo. É o caso de elevatórias e zona alta que não contam com reservatórios de regularização. As alternativas mais usuais para controle da vazão/pressão dos sistemas de bombeamento são válvulas de manobra ou variadores de velocidade de rotação de bombas.

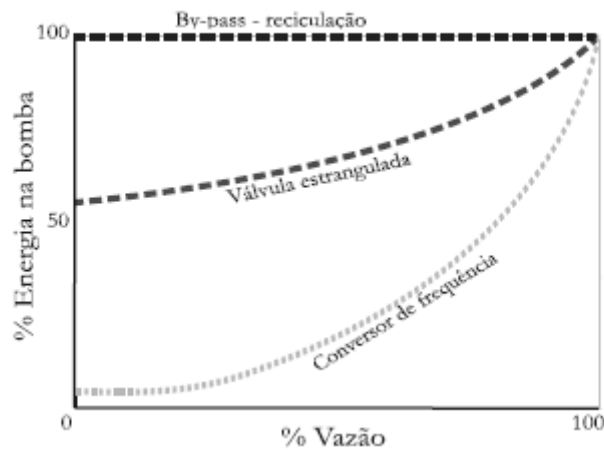
O controle por válvulas é feito por acréscimo na perda de carga deslocando o ponto de operação do sistema progressivamente sobre a curva da bomba, conforme figura 2. A operação com válvulas se destaca pela perda de energia consumida nos conjuntos motobombas, além da vida útil dos equipamentos é diminuída. (Wood e Reddy, 1994)

Figura 2: Curvas características com controle de vazão de pressão



A alternativa mais eficiente para variação de vazão e pressão é o controle de velocidade de rotação de bombas (EUROPUMP e HIDRAULIC INSTITUTE, 2004) . A figura 3 apresenta a comparação entre os consumo de bombas centrífugas típicas de 03 métodos mais utilizados. Pode-se verificar nitidamente a economia do uso de conversores de frequência acoplados aos Conjunto motobomba (CMB) em relação aos outros métodos.

Figura 3: Comparação do consumo de energia para os métodos de controle de vazão e pressão



As equações que relacionam a vazão, AMT e potencia com a velocidade de rotação são conhecidas com Lei de Similaridade:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{relação vazão x rotação}$$

$$\frac{AMT_1}{AMT_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad \text{relação AMT x rotação}$$

$$\frac{Pot_1}{Pot_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad \text{relação potência x rotação}$$

A faixa recomendada de operação é entre 50 e 100% o que não interfere significativamente no rendimento do CMB.

Portanto existe a necessidade de uma análise cautelosa do uso de motores com variadores de velocidade, pois os conversores de frequência apresentam vantagens e desvantagens. A avaliação técnica e econômica é necessária em cada caso, ou seja, de forma individualizada.

As principais vantagens dos sistemas com conversores de frequência em sistemas de bombeamento são:

- ✓ Controle da intensidade de corrente elétrica
- ✓ Economia de energia
- ✓ Aumento do fator de potência
- ✓ Elimina a necessidade de válvulas
- ✓ Melhor controle do processo
- ✓ Minimiza a quantidade de partidas e desligamentos dos motores
- ✓ Possibilita a automação do sistema
- ✓ Diminui a possibilidade de rompimento de adutoras e redes de abastecimento

As principais desvantagens da aplicação de conversores de frequência são:

- ✓ Alterações das condições ideais de operação das bombas;
- ✓ Custo inicial relativamente alto comparado às outras tecnologias
- ✓ Elevação da temperatura dos motores
- ✓ Geração de distorções harmônicas de tensão e corrente
- ✓ Limitação da distância entre motor e conversor de frequência
- ✓ Perdas no equipamento da ordem de 4% da potência elétrica absorvida da rede
- ✓ Não são tolerantes a regiões sujeitas à corrosão e alta umidade relativa do ar
- ✓ Exige uma equipe de manutenção especializada

A literatura e pesquisas acadêmicas apontam para diversos métodos de otimização na operação com conversores de frequência em sistemas de abastecimentos.

Lógica difusa

A LD (Fuzzi) é uma abordagem desenvolvida para lidar com a falta de precisão e incertezas nas variáveis do modelo, até mesmo nos objetivos. Pode ser utilizada para problemas de difícil compreensão devido à subjetividade e/ou falta de informação. Ao invés de usar equações matemáticas complexas, a LD utiliza descrições linguísticas para definir a relação entre a informação de entrada e saída da decisão.

Rede neural

A rede neural é um método computacional inspirado por estudos ligados ao cérebro e ao sistema nervoso de organismos biológicos. Tipicamente, é composto por um conjunto de unidades de processamento (neurônios, funções de ativação), operam com o princípio de aprender a partir de um conjunto de treinamentos. Existe uma variedade de modelos de aprendizagem (KARUNANITH et. al. 1994).

Algoritmo genético (AG)

A abordagem da computação evolucionária foi experimentada para superar as complexidades, como, múltiplos objetivos, descontinuidade e discretização que limitam as aplicações dos métodos de otimização analíticos de sistemas de reservatórios.

Os AG são sistemas adaptativos dos algoritmos evolucionários baseados conceitualmente na evolução natural e adaptação. Os estudos de AG originaram em 1975, com Holland (OLIVEIRA, LOUCKS, 1997) que baseou sua pesquisa no Princípio de Darwin. Desde então os AG têm sido aplicados em vários casos relacionados aos recursos hídricos: modelos de água subterrânea, otimização de redes de adução, métodos de chuva-vazão, modelos de *routing* de reservatórios.

Otimização por enxame de partículas (PSO)

Brentan (2014) utilizou-se da metodologia de otimização por enxame de partículas (em inglês: *particle swarm optimization*, PSO) desenvolvendo um algoritmo híbrido para determinação de rotinas otimizadas para o bombeamento de uma instalação de recalque.

OBJETIVO

Desenvolver uma metodologia de avaliação técnico financeira para viabilizar a instalação de conversores de frequência em sistemas de recalque na adução, quando operadas a remoto.

METODOLOGIA UTILIZADA

Na introdução deste trabalho, apresentamos que a instalação de conversores de frequência torna-se mais atrativo quando encontramos uma significativa variação de vazão/pressão. Isso ocorre principalmente nas elevatórias de zona alta, que atende diretamente o consumidor final e a variação de vazão e pressão é alta.

As elevatórias de adução têm como principal finalidade o atendimento aos reservatórios de regularização, sendo que em função de sua capacidade de reserva não causa uma significativa variação na vazão/pressão. Portanto, o estudo de viabilidade de implantação de conversores frequências, neste tipo de elevatória, deve ser mais aprofundado para garantir o retorno do investimento.

O estudo de caso, a seguir, irá demonstrar que a metodologia na busca da otimização da operação com conversores de frequência, foi feita de forma empírica e notaremos a necessidade do desenvolvimento de metodologia baseada em modelamento matemático.

Estudo de caso

A EEA França Pinto pertence ao Sistema Produtor Guarapiranga, com uma vazão de 1400 l/s, atende uma população equivalente a 400.000 habitantes. É a responsável pelo abastecimento do Reservatório Vila Mariana e parte do Reservatório Paulista, região onde localizam-se grandes conjuntos hospitalares e prédios comerciais.

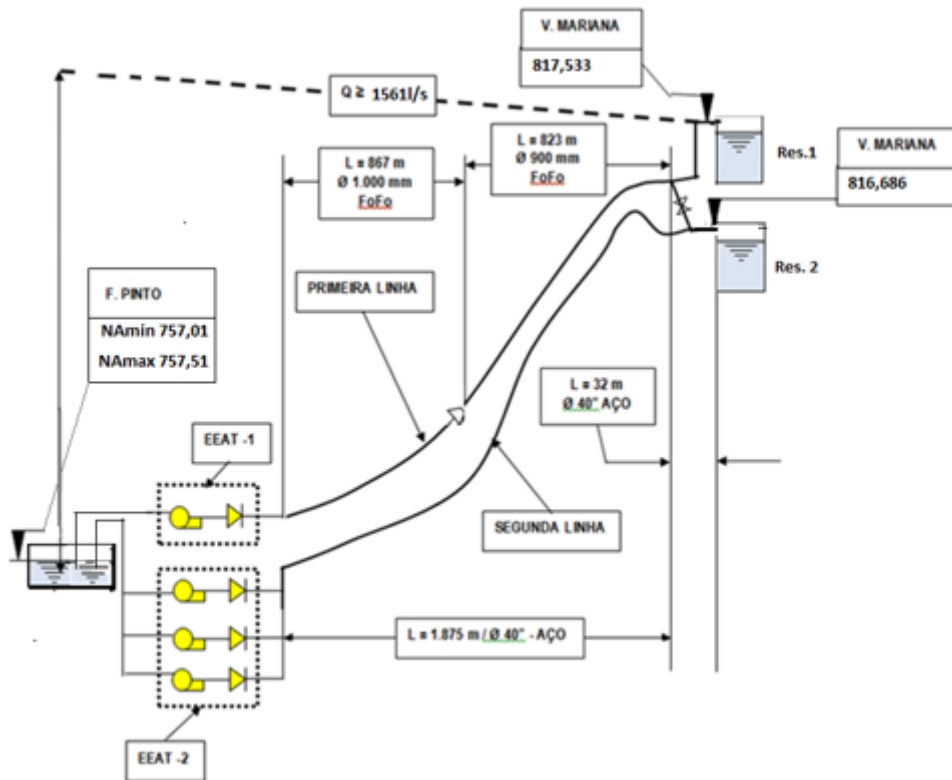
Em 2016, foi desenvolvido um projeto de substituição dos CMB e painéis elétricos por outros de maior desempenho energético. Este projeto foi concorrente do Programa de Eficiência Energética da AES Eletropaulo, daquele ano, sendo escolhido como um dos contemplados.

A Sabesp executou o projeto, por processo licitatório, utilizando-se de contrato de performance. A empresa vencedora do certame está sendo remunerada com base no incremento do desempenho energético proporcionado à elevatória.

Escopo:

Inicialmente a elevatória contava com duas linhas independentes no recalque e com 03 CMB de 600 cv + 1x1250 cv de potência, conforme figura 4 abaixo.

Figura 4: Configuração inicial da EEA França Pinto



Nessa condição, a elevatória apresentava o desempenho operacional conforme tabela 1.

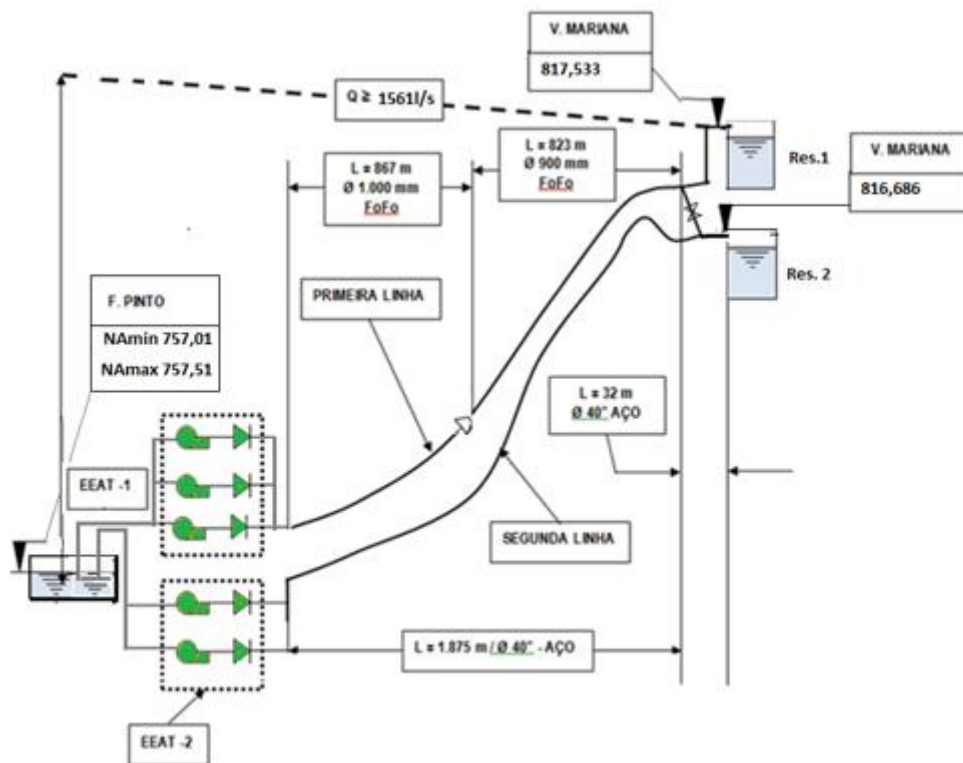
Tabela 1: Consumo de energia e volume aduzido em 2015 aduzida

Mês	Consumo de Energia (kWh/mês)			Vazão Média (l/s)	Volume Aduzido (m³/mês)	Consumo/Volume (Base Line) (kWh/m³)
	F. Ponta	Ponta	Total			
jan/15	728.293,40	69.354,20	797.647,60	1.476,31	3.826.584	0,2084
fev/15	764.328,60	73.083,80	837.412,40	1.468,65	3.806.738	0,2200
mar/15	808.991,80	80.979,40	889.971,20	1.405,22	3.642.330	0,2443
abr/15	828.760,00	77.066,20	905.826,20	1.457,12	3.776.845	0,2398
mai/15	847.659,10	71.011,90	918.671,00	1.400,72	3.630.663	0,2530
jun/15	809.798,20	77.006,20	886.804,40	1.274,66	3.303.925	0,2684
jul/15	846.607,00	85.333,90	931.940,90	1.306,12	3.385.471	0,2753
ago/15	789.486,60	76.791,10	866.277,70	1.264,44	3.277.418	0,2643
set/15	957.269,90	103.374,20	1.060.644,10	1.526,44	3.956.533	0,2681
out/15	966.276,80	100.337,20	1.066.614,00	1.654,01	4.287.194	0,2488
nov/15	996.589,00	97.880,60	1.094.469,60	1.578,96	4.092.675	0,2674
dez/15	930.465,90	96.475,30	1.026.941,20	1.487,60	3.855.848	0,2663
Média	856.210,53	84.057,83	940.268,36	1.441,69	3.736.851,96	0,2520

Fonte: [Scoa](#) e [webenergy](#)

Com o projeto a estação passou a contar com 4 + 1 CMB de 450 cv e duas linhas interligadas no recalque, conforme segue:

Figura 5: Configuração final da EEA França Pinto



Com a substituição dos CMB e simulação hidráulica o consumo específico esperado é de 0,2217 kWh/m³ (redução de 12%), com rotação fixa dos conversores de frequência. Inicialmente, o edital da licitação determinava a instalação de conversores de frequência em todos os equipamentos para reduzir o impacto na intensidade da corrente de partida dos motores e com isso minimizar a potência dos geradores de emergência a serem instalados posteriormente.

RESULTADOS OBTIDOS

Com a entrada em operação dos novos CMB e operando com rotação fixa, nota-se os seguintes resultados, na tabela 2.

Tabela 2: Resultados iniciais pós projeto

Condição inicial	Condição pós projeto
Vazão média 1441,0 l/s	Vazão média 1441 l/s
Consumo específico 0,2520 kWh/m ³	Consumo específico 0,2272 kWh/m ³
Consumo energia 941.238kWh	Consumo energia 848.608kWh
Demanda 1.800 kW	Demanda 1.250 kW
Custo R\$ 357.670,47	Custo R\$ 322.471,04
	Redução 9,09 %

Após essa condição inicial de rotação fixa, iniciou-se os procedimentos para aumentar o desempenho energético da elevatória com variação da velocidade do motor. Esta metodologia foi feita empiricamente para a condição operacional de 04 CMB operando, chegando a seguinte parametrização otimizada, conforme tabela 3.

Tabela 3: Parametrização da frequência de operação dos motores

Conjunto motobomba	Frequência (Hz)
01	59,5
02	59,5
03	59,5
04	58,5
05	58,5

Nessa condição obtivemos os seguintes resultados, conforme tabela 4.

Tabela 4: Resultado pós parametrização da rotação dos motores

Inicial	Pós projeto rotação fixa	Pós projeto rotação ajustada
Vazão média 1380 l/s	Vazão média 1380 l/s	Vazão média 1380 l/s
Con específico 0,2520 kWh/m ³	Con específico 0,2272 kWh/m ³	Con específico 0,2162 kWh/m ³
Con energia 901.393 kWh	Con energia 812.685 kWh	Con energia 773.338 kWh
Demanda 1.800,0 kW	Demanda 1250,0 kW	Demanda 1.160,0 kW
Custo R\$ 342.559,00	Custo R\$ 316.947,15	Custo R\$ 293.868,44
	Redução 7,5%	Redução 14,2 % (7,2%)

ANALISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Quando avaliamos os resultados apurados de uma forma simplificada, percebemos que o projeto teve êxito com a redução de 14,2% do consumo específico da instalação, quando a previsão inicial era de 12%. Portanto, a substituição dos conjuntos motobomba, por outros de maior desempenho energético trouxe o resultado muito próximo do esperado.

Cabe, neste momento, avaliar a necessidade da instalação dos conversores de frequência. Já vimos nos resultados obtidos que a substituição dos CMB reduziu o consumo específico de 0,2520 kWh/m³ para 0,2272 kWh/m³ e com a rotação adequada dos rotores proporcionada pelos conversores de frequência o indicador atingiu 0,2162 kWh/m³. O equipamento que substitui parcialmente os conversores de frequência são as *soft-starts* e na tabela 5 apresentamos as principais diferenças entre eles.

Tabela 5: Diferenças entre conversores de frequência e *soft-start*

Conversor de frequência (450 cv/440 V)	<i>Soft-start</i> (450 cv/440 V)
Corrente de partida = 1,5 x In	Corrente de partida = 3 x In
Perdas no processo = 4%	Perdas no processo = 0%
Varição de velocidade do rotor = sim	Varição de velocidade do rotor = não
Custo de investimento = R\$ 67.000,00	Custo de investimento = R\$ 17.000,00
Vida útil = 5 anos	Vida útil = 5 anos

Dentre as características, acima apresentadas, a que chama mais atenção são as perdas no processo, onde podemos recalcular o consumo de energia, caso tivéssemos *soft-starts* no lugar dos conversores de frequência, vide tabela 6.

Tabela 6: Viabilidade técnico financeira conversor de frequência e *soft-start*

(substituição dos 05 CMB)

Conversor de frequência	<i>Soft-start</i>
Vazão média 1380 l/s	Vazão média 1380 l/s
Con específico 0,2162 kWh/m ³	Con específico 0,2181 kWh/m ³
Con energia 773.338 kWh	Con energia 780.178 kWh
Demanda 1.160,0 kW	Demanda 1.200 kW
Custo R\$ 293.868,44	Custo R\$ 296.467,64
Redução 14,2 %	Redução 13,4%

Sob essas condições temos uma pequena vantagem do conversor de frequência em relação ao *soft-start*, da ordem de R\$ 2.599,20/mês, considerando a vida útil de 5 anos, temos: R\$ 155.952,00. Ocorre que o investimento ao final para substituir os 05 conversores de frequência comparado ao *soft-start*, será de R\$ 250.000,00, portanto a vantagem seria dissolvida e teríamos ainda um resultado negativo de R\$ 94.048,00.

Na avaliação consideramos a substituição de 05 CMB com conversores de frequência por 05 com *soft-starts* e percebemos vantagens na substituição, porém, agora avaliaremos substituir 03 CMB por *soft-starts* mantendo 01 CMB em cada linha com conversor de frequência para ser feita a parametrização da rotação do motor, os resultados são apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Viabilidade técnico financeira conversor de frequência e *soft-start*

(02 conversores de frequência e 03 *soft-start*)

05 conversores de frequência	05 <i>soft-starts</i>	02 conversores + 03 <i>soft-starts</i>
Vazão média 1380 l/s	Vazão média 1380 l/s	Vazão média 1380 l/s
Con específico 0,2162 kWh/m ³	Con específico 0,2181 kWh/m ³	Con específico 0,2118 kWh/m ³
Con energia 773.338 kWh	Con energia 780.178 kWh	Con energia 757.871 kWh
Demanda 1.160,0 kW	Demanda 1.200 kW	Demanda 1.136,4 kW
Custo R\$ 293.868,44	Custo R\$ 296.467,64	Custo R\$ 287.990,98
Redução 14,2 %	Redução 13,4%	Redução 15,9%

Sob essas condições apresenta-se uma maior vantagem da configuração 02 conversores de frequência com 03 *soft-starts* comparado com 05 *soft-starts*, da ordem de R\$8.477,64/mês, considerando a vida útil de 5 anos temos: R\$ 508.658,40. Ao final da vida útil para substituir os 02 conversores de frequência

comparado aos *soft-starts* será de R\$ 100.000,00, portanto a configuração 02 conversores de frequência com 03 *soft-starts* é a que apresenta vantagem financeira sobre as demais.

Nas 03 configurações avaliadas, o acionamento e desligamento dos CMB são realizados a remoto por operador do Centro de Controle da Operação (CCO).

CONCLUSÃO

A análise dos resultados obtidos demonstra que existe viabilidade para implantação de conversores de frequência em elevatórias de adução, mas necessita de um aprofundamento analítico para identificar as vantagens de sua aplicação, quando comparados aos *soft-starts*. A pesquisa não avaliou o ajuste dinâmico da rotação dos motores, pois os CMB são acionados a remoto, pelos operadores do CCO.

RECOMENDAÇÕES

As pesquisas acadêmicas têm demonstrado que existe potencial de redução de custos de energia elétrica quando utilizamos conversores de frequência em elevatórias de adução, associados a modelos matemáticos de otimização, a automação da operação, ao conhecimento do histórico da demanda horária de consumo e a capacidade do reservatório a ser atendido.

Alguns questionamentos ainda necessitam de respostas:

- 1-) Os filtros ativos minimizam os efeitos das distorções harmônicas e aumentam ciclo de vida da instalação o provocadas pelos conversores de frequência, o investimento traz relação vantajosa de custo benefício?
- 2-) Quando existe possibilidade de otimização energética por conversores de frequência, qual configuração é mais adequada, total ou parcial?
- 3-) A automação da elevatória, sem operação a remoto, com modelos matemáticos de otimização com variação dinâmica dos conversores de frequência, trazem benefícios operacionais e ao desempenho energético?

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

WOOD,D.J., REDDY L.S. Control de bombas de velocidad variable y moelos em tempo real para minimizar fugas y costes energéticos. Curso Dictado em la UINP: Mejora del Rendimiento y de la Fiabilidad em Sistemas de Distribución de Água. pp. 173-207, Valência, Espanha, 1994.

EUROPUMP, HYDRAULIC INSTITUTE. Variable Speed Pumping – A guide to successful applicationa. 1 ed., Bodmin, Cornwall, Mai, Elsevier, 2004.

OLIVEIRA, R.; LOUCKS, D. P. Operation rules for multireservoir systems. Water Resources Research. v. 33, n. 4, p. 839-852, 1997.

BRENTAN, B. MELO. PSO Com Refinamento Para Definição de Manobras Visando à Redução do Custo Energético no Bombeamento de Água. 2014. p. 104 Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

GOMES, H.P. Livro: Sistemas de Saneamento – Eficiência Energética, 2010, Editora Universitária – UFPB, João Pessoa – PB.