

Benefícios da utilização do inversor de frequência no controle de nível em sistemas de abastecimento de água

Marcos Batista dos Santos, Orientador: Msc. Prof. Alexandre Ribeiro

Resumo – Este artigo tem como finalidade a aplicação de inversor de frequência em processos industriais que trabalham com muitas partidas e paradas de conjuntos motorbomba (CMB) em sistemas de abastecimento de água, que não possuem demanda de consumo fixa e tem seus equipamentos dimensionados para atenderem aos casos mais críticos. O estudo foi feito na Estação Elevatória da Empresa Baiana de Abastecimento de Água, do bairro Garcia, da cidade de Salvador (Brasil), onde foi implantado o sistema. A aplicação tem como finalidade obter economia de energia, melhor aproveitamento do nível de operação do reservatório e menores desgastes dos equipamentos envolvidos no sistema. O resultado obtido foi satisfatório. Apesar da necessidade de algumas alterações estruturais do processo, a economia de energia foi facilmente demonstrada no primeiro mês de implantação do novo sistema, trazendo um retorno financeiro em um prazo menor do que o esperado e uma grande economia nos períodos seguintes.

Palavras-chave – Eficiência energética; Inversor de frequência; Reservatórios de água

1 Introdução

Após as grandes crises que o setor energético nacional tem passado nos últimos anos, a indústria tem buscado cada vez mais equipamentos tecnológicos que forneçam recursos destinados à eficiência energética. Nos processos industriais, são amplamente utilizados motores para diversas finalidades, dimensionados para atender às necessidades para as quais foram destinadas as operações do equipamento.

Nas estações elevatórias de água dos reservatórios da empresa de abastecimento, que trabalham com conjuntos motorbomba (CMB) responsáveis pelo transporte da água entre reservatórios no intuito de atribuir potencial gravitacional, existe a necessidade de se trabalhar com muitas variações durante o processo, onde o equipamento não é dimensionado a atender uma situação

constante. Ao invés disso, ele é projetado para todos os níveis de atuação e dimensionado para suportar os momentos mais críticos do processo. Essa característica das estações elevatórias ocorre por vários fatores como: horários variados de demanda mínima e máxima devido à rotina da comunidade envolvida, fatores climáticos, hábitos de higiene desta comunidade, qualidade da água, cobrança (água medida ou não) dentre outros. Para uma mesma população, o consumo varia de acordo com as horas do dia e também conforme a época do ano. Sendo assim, as bombas responsáveis pelo transporte desta água são dimensionadas para os casos mais críticos. Nas situações em que o consumo está em níveis mais baixos, a água bombeada pelo CMB excede o nível de trabalho do reservatório elevado, pois estão superdimensionados para aquele momento do dia, iniciando assim um processo de recirculação onde uma tubulação de extravasamento localizada no nível máximo de operação, transporta o excedente de volta para o reservatório semi-apoiado para não transbordar o reservatório elevado. Esse processo de recirculação causa um gasto de energia desnecessário. O custo com energia elétrica na empresa está entre os três maiores gastos da empresa.

Do total da energia consumida no país, estima-se, segundo a Empresa de Pesquisa Energética EPE (2016), que 36% é consumida pelo setor industrial, sendo o setor de maior consumo comparado com o setor residencial que equivale a 29% do total, o setor comercial 19% e os demais setores como iluminação pública e outros, que juntos representam os 16% restantes.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a utilização do inversor de frequência no controle de nível de uma das estações elevatórias dos reservatórios de abastecimento de água da cidade de Salvador, comparando o consumo de energia elétrica antes e após o início do uso dessa tecnologia, de modo a investigar o aproveitamento dos níveis de operação dos reservatórios e a redução no número de paradas e partidas bruscas, causando menor impacto para as linhas hidráulicas e aos equipamentos envolvidos no processo.

2 Materiais e métodos

A análise é classificada como estudo de caso que busca identificar e quantificar as melhorias no ambiente utilizado para a pesquisa. Trata-se de uma pesquisa de campo que tem como propósito comprovar a fundamentação teórica em sua aplicação prática.

As principais fontes bibliográficas deste estudo são livros que contemplam a automação e a instrumentação industrial e máquinas elétricas, catálogos e manuais dos equipamentos analisados, artigos que tratam de aplicações similares com as abordadas no presente trabalho e conteúdo da internet, por se tratar de uma tecnologia em ascensão.

O estudo de caso abordou a utilização de inversores de frequência no controle de nível de um reservatório de água da empresa de abastecimento de água da Bahia. As observações e a coleta de informação foram realizadas com o acesso autorizado pela empresa à EEAT5 (Estação Elevatória de Água Tratada do Reservatório 5 – Garcia) e com arquivos do histórico de análises operacionais e do consumo de energia da mesma, de modo a validar o projeto em desenvolvimento. A análise destina-se à identificação das principais vantagens e melhorias na conservação dos equipamentos e eficiência no consumo de energia elétrica consequente da aplicação do novo sistema de controle de nível.

3 Discussão

Os grandes sistemas industriais sempre tiveram como base o chão de fábrica, onde está a mão de obra que constrói os pilares da produção, criando grandes organizações. Por muitos anos, as

pessoas dedicaram horas do seu dia e até mesmo sua própria saúde física e mental para os fins lucrativos de seus empregadores.

Com as evoluções tecnológicas, foram criados equipamentos capazes de executar tarefas anteriormente exaustivas e às vezes até impossíveis de serem exercidas pelo homem. Na indústria, os motores e os sistemas de automação conseguem substituir funcionários das funções de extremo esforço, com trabalho exaustivo e monitoramento constante com alta demanda e de elevada precisão, onde a mão de obra humana não poderia mais suprir os afazeres do processo.

Nesse estudo, iremos citar os principais equipamentos que compõem esse sistema, seus dimensionamentos e funcionalidades detalhando as necessidades do processo. Em seguida, serão analisadas as intervenções necessárias para o aprimoramento desse sistema com a aplicação do inversor de frequência, substituindo o tipo de acionamento do projeto e permitindo um novo sistema de controle.

3.1 Automação industrial

Uma boa definição para automação industrial é o conjunto de técnicas destinadas a tornar automática a realização de tarefas, substituindo o gasto de bio-energia humana, com esforço muscular e mental, por elementos eletrônicos computáveis. (SILVEIRA; LIMA, 2003, p. 2)

Hoje, temos sistemas e equipamentos capazes de executar inúmeras funcionalidades em grandes processos de formas cada vez mais eficientes. O intuito da automação para o futuro é comodidade, economia e sustentabilidade, ganhando cada vez mais espaço dentre os fins lucrativos de pequenas e grandes corporações.

Para o funcionamento pleno de um processo industrial que utiliza os recursos da automação, é necessário um conjunto de componentes responsáveis por cada etapa do sistema de controle. A seguir, veremos a composição básica desse sistema.

3.1.1 Sensores

"Os sensores são os componentes mais utilizados no mundo da eletroeletrônica. Eles estão presentes no dia a dia nas mais variadas situações (carros, elevadores, portas automáticas, eletrodomésticos, etc.). Esses dispositivos também constituem toda a base da automação, seja ela industrial, predial (doméstica) ou comercial."(CAPELLI, 2011, p. 129)

Os sensores são os componentes que possuem maior contato com o produto e os demais equipamentos do sistema, trabalhando com suas grandezas físicas e transformando geralmente em informações elétricas. É através deles que são captadas as informações necessárias para o funcionamento de todo o conjunto. Pode-se dizer que os sensores são os olhos, a audição, o olfato e o tato se compararmos os sistemas automáticos com o funcionamento do corpo humano. São os sensores que conectam os equipamentos eletrônicos com o mundo.

O sistema estudado possui um sensor de nível ultrassom para identificar e transmitir o valor de altura em metros da água presente no reservatório elevado.

3.1.2 Controladores

O controlador é o componente central do sistema, é o cérebro. É ele que recebe as informações captadas do processo e toma as decisões previamente programadas pelo usuário. O controlador utiliza-se de bases e métodos matemáticos, armazenamento de dados, comparação, temporização, contagem, sequenciamento e etc., para executar seus algoritmos e tomar as decisões exatas a serem exercidas de acordo com cada variação obtida do sistema.

Por ser constituído de componentes da microeletrônica trabalhando basicamente com software e hardware, sua capacidade de exercer variadas funcionalidades em alta velocidade de processamento é, na atualidade, a essência do conceito de eficiência dos sistemas industriais.

3.1.3 Atuadores

Os atuadores são os componentes responsáveis pela interferência direta no sistema. Eles que executam a necessidade dos componentes automáticos de aplicar alguma variação no processo.

Os atuadores fazem o trabalho inverso aos sensores. São os componentes que recebem comandos do controlador por sinais elétricos e transformam em uma grandeza física, na maioria das vezes em trabalho mecânico, para alterar alguma característica do processo que contribua com a continuidade da finalidade do sistema.

3.2 Motores

"O motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica (giro do seu eixo). Dentre as vantagens de utilizar o motor elétrico em vez de qualquer outro, podemos citar as principais: baixo custo, simplicidade, facilidade de transporte, limpeza, alto rendimento e fácil adaptação às condições adversas."(CAPELLI, 2011, p. 71)

Os motores de indução trifásicos assíncronos de rotor tipo gaiola de esquilo representam a totalidade dos motores elétricos utilizados pela empresa em suas estações elevatórias de água.

Segundo Filho (2015), em um motor trifásico tipo gaiola o controle de velocidade deve ser feito através do estator, devido ao fato de o rotor ser isolado e curto-circuitado.

A velocidade é medida em rotações por minuto (rpm) e segundo as equações 1 e 2 de rotação nominal do motor e rotação síncrona do motor, respectivamente, ela pode ser alterada variando o número de polos, o escorregamento e a frequência da tensão fornecida pela rede.

$$n = ns \times \left(1 - \frac{s\%}{100}\right) \quad (1)$$

$$ns = \frac{120 \times f}{p} \quad (2)$$

n = rotação nominal do motor (rpm);
ns = rotação síncrona do motor (rpm);
s = escorregamento do motor;
f = frequência da rede de alimentação;
p = número de polos do motor.

Na indústria, é importante avaliar os tipos de acionamentos dos motores para respeitar suas aplicações e dimensionamentos. Vamos citar os acionamentos mais comuns e seus respectivos recursos, relacionando as necessidades do processo onde serão implantados.

3.3 Acionamentos

3.3.1 Convencional

O mais conhecido e utilizado acionamento convencional de motores é a partida direta. Na partida direta é utilizado o contator, um componente eletromagnético que, quando é iniciada

a alimentação de sua bobina, ocorre uma movimentação mecânica que conecta os terminais móveis aos terminais fixos, fechando os contatos do circuito de força do motor, dando início a seu funcionamento. É possível associar ao circuito de força e de comando do contator alguns dispositivos de proteção do motor que param seu funcionamento em casos de aumento na temperatura, sobrecorrente, falta de fase, dentre outros.

Esse tipo de acionamento está sendo cada vez menos utilizado, principalmente em partida de motores de grande porte, devido à falta de controle durante a partida e durante sua operação.

3.3.2 Partida Suave - Soft Starter

O Soft Starter é um dispositivo eletrônico que controla a tensão através do circuito de força do motor, variando o ângulo de disparo dos seus componentes semicondutores, variando a tensão eficaz aplicada no motor. Controlando a corrente de partida do motor é possível obter uma partida suave, não causando quedas de tensão bruscas na rede como acontece na partida direta.

Esse tipo de partida está sendo cada vez mais utilizada na indústria, com a finalidade de evitar os danos causados pelas partidas bruscas, principalmente quando se trabalha com motores de grande porte.

3.3.3 Variação de velocidade - inversor de frequência

Os inversores de frequência são muito utilizados, variando a velocidade e o torque dos equipamentos de um processo, controlando a frequência da tensão e as correntes de magnetização dos motores de indução trifásicos. Esse controle é determinado de acordo com o seu tipo, sendo escalar ou vetorial.

Esse equipamento traz muitos recursos para a automação industrial, com implementação fácil de suas funções e com instalação simples e prática.

A função do inversor de frequência é controlar a velocidade e o torque do motor de corrente alternada, segundo um comando eletrônico. Esse equipamento é muito utilizado nas mais diversas áreas, como elevadores, máquinas-ferramenta, bombas, tração mecânica, etc. (CAPELLI, 2011, p.94).

Além de controlar o funcionamento do equipamento, o mesmo é responsável pela proteção dos motores. A grande maioria dos modelos no mercado permite a proteção contra: sobrecorrente, subcorrente, sobretorque, falta de fase e inversão de fase. (FILHO, 2015, p.30).

A variação na rotação do conjunto feita através do inversor de frequência tem relações diretas com as principais características do sistema, como observa-se nas leis de similaridade ou nas leis de semelhança das máquinas hidráulicas, representadas pelas equações 3, 4, 5 e 6:

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{n}{n_1} \quad (3)$$

$$\frac{H}{H_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{P}{P_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^3 \quad (5)$$

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 \quad (6)$$

O inversor economiza energia elétrica. Dois clássicos exemplos são bombas e ventiladores, em que o consumo é reduzido ao cubo. Um motor desse tipo, quando ligado a um inversor a meia velocidade, gasta apenas 12,5% do que consumiria se estivesse ligado à rede elétrica diretamente. (CAPELLI, 2011, p.94).

Observando as equações de similaridade é possível entender que do ponto de vista do consumo energético é eficiente trabalhar com o inversor de frequência variando a velocidade de rotação do motor. À proporção que reduzimos a rotação, temos uma redução cúbica da potência no consumo de energia elétrica do equipamento. Essa economia de energia é o parâmetro que será fortemente analisado ao decorrer desse estudo.

3.4 Reservatório de água

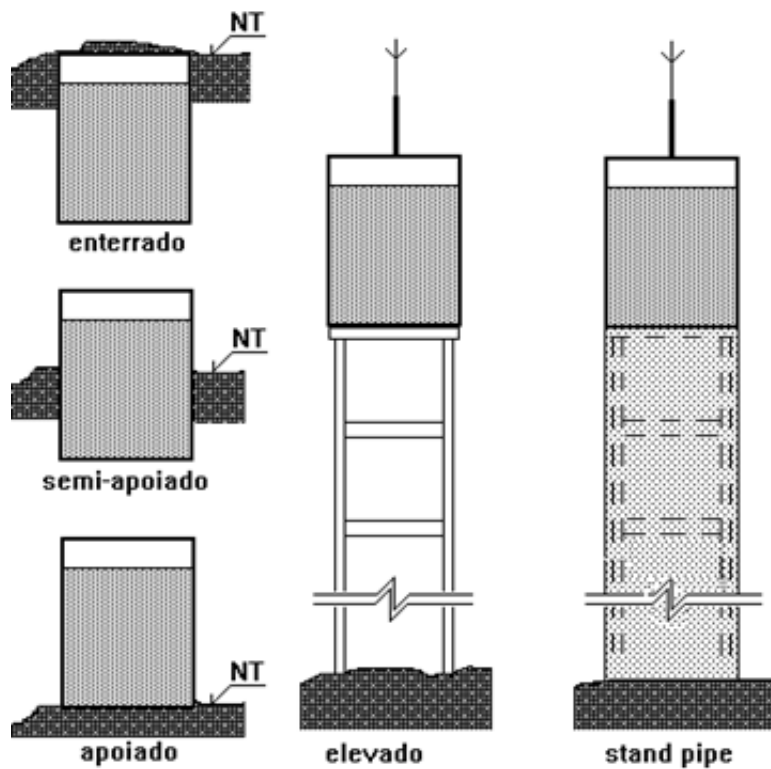
É empregada a reservação de água com o propósito de: atender a variação do consumo; manter uma pressão mínima ou constante na rede; atender demandas de emergências, em casos de incêndios, ruptura de rede, etc.

O consumo de uma comunidade está ligado a diversos fatores: horários variados de demanda mínima e máxima devido à rotina da comunidade envolvida, fatores climáticos, hábitos de higiene desta comunidade, qualidade da água, cobrança (água medida ou não), dentre outros. O reservatório de distribuição, permite atender a essas variações.

A seguir é apresentada uma classificação do reservatório de água de acordo com a localização no terreno segundo Filho (2009) ilustrada na Figura 1:

- enterrado (quando completamente embutido no terreno);
- semi-enterrado ou semi-apoiado (altura líquida com uma parte abaixo do nível do terreno);
- apoiado (laje de fundo apoiada no terreno);
- elevado (reservatório apoiado em estruturas de elevação);
- stand pipe (reservatório elevado com a estrutura de elevação embutida de modo a manter contínuo o perímetro da seção transversal da edificação).

Figura 1 – Tipos de reservatórios de água, de acordo com a localização no terreno



Fonte: (FILHO, 2009)

3.5 Operação da Estação Elevatória do R5 García

Figura 2 – Estação Elevatória R5



Fonte: elaborado pelo autor

O R5 (Reservatório 5 – localizado no bairro García) é receptor de água tratada que vem do R7 (Reservatório 7 – localizado no bairro Cabula), que serve como intermediário da ETA principal (Estação de Tratamento de Água – localizada em Candeias) de onde se origina o quase total abastecimento da RMS (Região Metropolitana de Salvador).

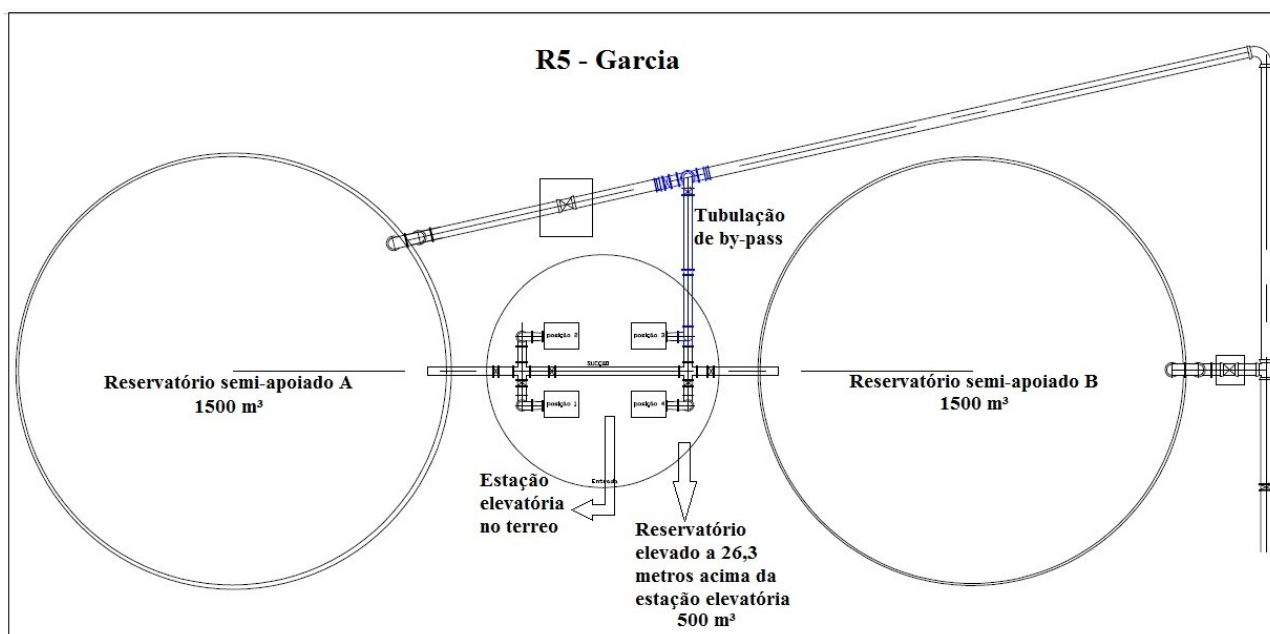
A EEAT5 do R5 ilustrada na [Figura 2](#), tem a finalidade de atribuir potencial gravitacional à água, transportando-a de um reservatório semi-apoiado (reservatório com cotas abaixo do nível de chegada de água à estação), armazenando sua reservação em um reservatório elevado (reservatório localizado sobre uma torre), com cotas superiores a sua região de abastecimento denominada como ZA 03 (Zona de Abastecimento 3), constituída pelos seguintes bairros: Garcia (parte), Centro, Centro Histórico, Tororó, Nazaré (parte) e Barris. A estação também é responsável pelo seu próprio monitoramento operacional, funcionando em modo automático, controlando o abastecimento do reservatório elevado de acordo com a demanda de consumo da comunidade.

O sistema de bombeamento, controle e reservação da EEAT5 Garcia é constituído basicamente por:

- 2 reservatórios semi-apoiados;
- 1 reservatório elevado;
- 4 conjuntos motorbomba;
- Sistema de medição e controle de nível.

Na [Figura 3](#) apresenta-se a planta baixa do R5, destacando os dois reservatórios semi-apoiados, a estação elevatória, tubulações e indicando o reservatório elevado localizado acima da estação elevatória.

Figura 3 – Planta baixa do R5 Garcia



Fonte: dados da pesquisa

Das quatro bombas da estação, somente uma é necessária para atender a demanda durante uma boa parte do dia, sendo necessária a operação da segunda bomba em períodos de maior consumo. As duas bombas restantes ficam como reserva para necessidade de manutenção.

Quando a demanda está em níveis muito baixos, a água bombeada tem o potencial de exceder o nível do reservatório elevado por ser maior que a demanda de consumo. Ocorre também uma situação parecida, quando em períodos de maior consumo, onde existe a necessidade de uma vazão um pouco maior do que a fornecida por uma bomba, entra em operação a segunda bomba ofertando o dobro da vazão anterior. Para não transbordar o reservatório elevado em nenhuma das duas situações, existe uma tubulação de saída próxima ao topo do mesmo, pois ao chegar em seu nível máximo, a água encontra um caminho para ser direcionada novamente ao reservatório semi-apoiado, iniciando um processo de recirculação de água, causando um gasto desnecessário de energia elétrica.

Com a finalidade de obter mais eficiência na operação da planta, tornou-se necessária a utilização de um novo sistema para o controle de nível do reservatório elevado, visando economia no consumo de energia elétrica por parte dos motores responsáveis pelo bombeamento. Vamos analisar os equipamentos instalados no local de acordo com o tipo de acionamento e controle.

3.6 Projeto e operação por partida direta

Os motores eram acionados com contadores por partida direta, ocasionando uma partida brusca, não oferecendo a possibilidade de variações de velocidade na operação do motor. Desta forma, não era possível ter o controle da vazão de água bombeada para o reservatório elevado. Toda a estação era dimensionada para operar nessas condições, onde o CMB operava em rotação e vazão máximas, captando água do reservatório apoiado que possui uma cota mínima de aproximadamente 61 metros e bombeando para o reservatório elevado na cota máxima de aproximadamente 96 metros. Assim, era algo em torno de 35 metros de coluna d'água a ser vencida durante a operação dos CMB, altura essa vencida tranquilamente com operação total do conjunto observado nos dados da curva de performance da bomba. A [Figura 4](#) mostra um dos CMB e, a seguir, os dados dos motores e das bombas projetados e instalados na estação:

Bomba Sulzer Weise SN 302-320

Potência: 250 CV

Rotação: 1750 rpm

Altura manométrica: 38,5 m

Vazão: $1000\text{m}^3/\text{h}$

Densidade: $1\text{kg}/\text{dm}^3$

Rendimento: 81 %

Motor Siemens

Potência: 150CV/110,3 kW

Rotação: 1789 rpm

Tensão: 220/380/440 V

Corrente: 360/205/180 A

F.P.: cos ϕ : 0,85

Rendimento: 95,1 %

Figura 4 – CMB (Conjunto Motorbomba)



Fonte: dados da pesquisa

3.7 Medidor de nível e inversor de frequência

Como o controle de nível da estação trabalha com sensor ultrassônico mandando informações para o medidor indicador e controlador de nível MultiRanger 100 da Siemens, ilustrado na [Figura 5](#), que fornece dados detalhados da variação do nível, não só de maneira visual por interface digital, mas também variações de sinal analógico em 4–20 mA para comunicação com equipamentos de controle, foi possível implementar um modelo mais eficiente com a aplicação de um inversor de frequência com controlador lógico integrado Danfoss VLT Aqua Drive, ilustrado na [Figura 6](#), variando a velocidade dos CMB, recebendo informação do MultiRager 100, fazendo assim um controle indireto do nível através da variação de frequência. Como visto nas Figuras 5 e 6, apresentam-se as imagens dos equipamentos no local e a seguir as principais características do inversor de frequência:

Potência: 110 kW/150 HP/CV

Valores na entrada do circuito de força:

Tensão: 380/440 V

Corrente: 204/138 A

Frequência: 50/60 Hz

Valores na saída do circuito de força:

Tensão: 0 – Vin (tensão de entrada) V

Corrente: 212/190 A

Frequência: 0 – 800 Hz

Figura 5 – Medidor de nível



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6 – Inversor de frequência



Fonte: elaborado pelo autor

3.8 Altura manométrica e perda de carga

Com o intuito de implementar o controle de nível com inversor de frequência, foi encontrada a necessidade de fazer alterações estruturais no sistema hidráulico da estação. A partir do momento em que se altera a rotação do conjunto, altera-se também a vazão do fluido bombeado e a altura manométrica a ser vencida pelo mesmo. Sendo assim, foi preciso avaliar as curvas de operação da bomba com as variações de rotação em relação a curva do sistema, considerar a perda de carga da tubulação e dos seus componentes e calcular quais modificações seriam necessárias para a implantação do novo sistema de controle.

"Na prática, as canalizações não são constituídas exclusivamente por tubos retilíneos e de mesmo diâmetro. Usualmente, inclui ainda peças especiais e conexões que, pela forma e disposição, elevam a turbulência, provocam atritos e causam choques de partículas, dando origem à perda de carga. Além disso, apresentam-se nas canalizações outras singularidades, como válvulas, registros, medidores, etc., também responsáveis por perdas dessa natureza." (NETTO; FERNANDEZ ; et al., 1998, p.115)

Vamos utilizar cálculos de perda de carga para obter os valores de pressão na montante da bomba, para avaliar as possíveis variações de rotação, de vazão e de altura manométrica.

PERDA DE CARGA – MÉTODO DE HAZEM-WILLIAMS

Para diâmetro de tubulação maior que 50 mm, como no nosso caso, esse é o método mais utilizado no transporte de água e de esgoto em canalizações diversas. Sua forma é dada pela equação 7:

O coeficiente de rugosidade C assume valores de acordo com o material e com as condições da tubulação. À medida que esse tubo é construído por material mais liso, esse valor tende a ser maior. Na Tabela 1 são apresentados alguns valores deste coeficiente para os tubos mais usados atualmente:

$$H_l = L \times \frac{10,641}{C^{1,85}} \times \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}} \quad (7)$$

H_l = Perda de carga (m)

L = Comprimento (m)

Q = Vazão (m^3/s)

D = Diâmetro (m)

C = Coeficiente de rugosidade do material fabril e condições das tubulações

Tabela 1 – Coeficientes de rugosidade do tipo de tubo

TIPO DE TUBO	C
Aço soldado com 30 anos	75
Aço soldado com 20 anos	90
Ferro fundido, usado	90
Ferro fundido, com 15 anos	100
Aço galvanizado, usado	100
Aço galvanizado, com costura	125
Aço galvanizado, com costura novo	130
Cobre e latão	130
Plástico PVC, até 75 mm	125
Plástico PVC, até 100 mm	135
Plástico PVC, mais de 100 mm	140

Fonte: (BARRAL, 2011)

Após as avaliações, observou-se que ao trabalhar variando a rotação da bomba para valores menores a altura manométrica também iria diminuir. De acordo com dados de curva da bomba, não seria possível vencer a altura necessária para transportar água para o reservatório elevado.

A cota de captação de água do reservatório semi-apoiado é de 62,90 metros, onde está a sucção da bomba, e ela deve transportar a água para o ponto de cota 95,00 metros no topo do reservatório elevado, dando um total de aproximadamente 33 metros de coluna d'água. De acordo com as equações de similaridade, essa altura somente seria vencida por, no mínimo, uma rotação de 1650 rpm, dando uma pequena faixa de variação ao processo.

Existe uma derivação da adutora principal do R7 (Cabula) que segue para a estação em estudo R5 (García). Neste ponto de derivação, a diferença de diâmetros das tubulações é muito grande, onde a tubulação de maior diâmetro da adutora tem uma influência de pressão muito pequena na tubulação de menor diâmetro que transporta a água até o R5, indicando assim o ponto de maior representação da cota responsável pela pressão exercida na chegada da bomba. A cota deste ponto é de 82 metros.

A solução encontrada foi aumentar a pressão na montante da bomba, fazendo um by-pass do reservatório semi-apoiado, conectando a rede de chegada diretamente na tubulação da linha de recalque. Assim, a pressão exercida na bomba seria da cota de 82 metros e não mais da cota de 65,90 metros do reservatório apoiado. Com uma pressão maior na chegada, será necessária uma altura manométrica menor para vencer a coluna d'água, possibilitando a variação de velocidade da bomba para rotações menores. Para isso ser simulado e comprovado, foram feitos cálculos utilizando o método de Hazem Williams, considerando as perdas de carga causadas pela tubulação que conecta a cota de 82m até a montante da bomba, criando uma nova curva do sistema.

Logo abaixo será mostrado como são efetuados os cálculos de perda de carga utilizando esse método para a vazão de $700 \text{ m}^3/h$, considerando os três tipos diferentes de tubulações e seus

respectivos comprimentos, calculando também a altura manométrica obtida após as perdas de carga encontradas.

$$H_l = L \times \frac{10,641}{C^{1,85}} \times \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}} \quad (8)$$

$$H_{Derivação/Redu1} = 850 \times \frac{10,641}{85^{1,85}} \times \frac{(700/3600)^{1,85}}{(800 \times 10^{-3})^{4,87}} \quad (9)$$

$$H_{Derivação/Redu1} = 0,35m \quad (10)$$

$$H_{Redu1/Redu2} = 670 \times \frac{10,641}{37^{1,85}} \times \frac{(700/3600)^{1,85}}{(550 \times 10^{-3})^{4,87}} \quad (11)$$

$$H_{Redu1/Redu2} = 7,57m \quad (12)$$

$$H_{Redu2/R5} = 370 \times \frac{10,641}{85^{1,85}} \times \frac{(700/3600)^{1,85}}{(600 \times 10^{-3})^{4,87}} \quad (13)$$

$$H_{Redu2/R5} = 0,62m \quad (14)$$

Em seguida, na [Tabela 2](#), são apresentadas as alturas manométricas resultantes do cálculo das perdas de carga nas demais variações de vazão que vão de 600 até 1100 m^3/h , a fim de avaliar melhor a faixa de operação do sistema, deixando-a em destaque.

Tabela 2 – Parâmetros calculados para construção da curva de sistema

Saída	Chegada	Diam. (mm)	Comp. (m)	Rug. (*)	Vazão (m^3/h)	Perda (mca)	Perda Total (mca)
Derivação	Redu. 1	800,0	850	85,00	600,00	0,26	0,26
Redu. 1	Redu. 2	550,0	670	38,00	600,00	5,69	5,96
Redu. 2	R5	600,0	370	85,00	600,00	0,46	6,42
Derivação	Redu. 1	800,0	850	85,00	700,00	0,35	0,35
Redu. 1	Redu. 2	550,0	670	38,00	700,00	7,57	7,92
Redu. 2	R5	600,0	370	85,00	700,00	0,62	8,54
Derivação	Redu. 1	800,0	850	85,00	800,00	0,45	0,45
Redu. 1	Redu. 2	550,0	670	38,00	800,00	9,69	10,14
Redu. 2	R5	600,0	370	85,00	800,00	0,79	10,93
Derivação	Redu. 1	800,0	850	85,00	900,00	0,56	0,56
Redu. 1	Redu. 2	550,0	670	38,00	900,00	12,05	12,61
Redu. 2	R5	600,0	370	85,00	900,00	0,98	13,59
Derivação	Redu. 1	800,0	850	85,00	1.000,00	0,68	0,68
Redu. 1	Redu. 2	550,0	670	38,00	1.000,00	14,65	15,32
Redu. 2	R5	600,0	370	85,00	1.000,00	1,19	16,52
Derivação	Redu. 1	800,0	850	85,00	1.100,00	0,81	0,81
Redu. 1	Redu. 2	550,0	670	38,00	1.100,00	17,47	18,28
Redu. 2	R5	600,0	370	85,00	1.100,00	1,42	19,70

Fonte: dados da pesquisa

Somando as perdas de carga:

$$H_{total} = 0,35 + 7,57 + 0,62 \quad (15)$$

$$H_{total} = 8,54m \quad (16)$$

Logo após é calculada a altura manométrica a ser fornecida pela bomba em relação à cota de pressão da origem 82m com a perda de carga da linha até a cota de destino 96m:

$$Alt.man_{700m^3/h} = 96 - (82 - H_{total}) \quad (17)$$

$$Alt.man_{700m^3/h} = 96 - (82 - 8,54) \quad (18)$$

$$Alt.man_{700m^3/h} = 22,54m \quad (19)$$

Desta forma, são apresentados, na [Tabela 3](#), os dados de altura manométrica do sistema calculada em todas as demais vazões. Na faixa destacada de 22,54 até 30,52 m.c.a. estão as referências do ponto mínimo ao ponto máximo de operação da bomba no sistema.

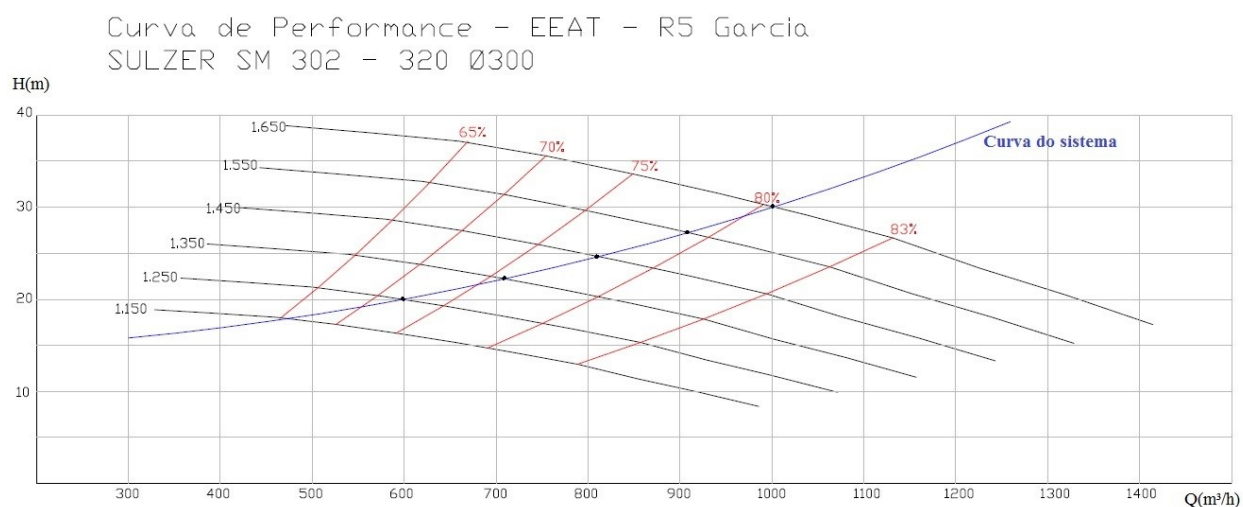
Com a aplicação desse método foi possível obter a curva do sistema e cruzar com a curva da bomba, representada pela [Figura 7](#).

Tabela 3 – Parâmetros calculados para construção da curva de sistema

Vazão (m^3/h)	Perda Total da Linha (m.c.a.)	a.m.t. do Sistema (m)
600	6,42	20,42
700	8,54	22,54
800	10,93	24,93
900	13,59	27,59
1000	16,52	30,52
1100	19,70	33,70

Fonte: dados da pesquisa

Figura 7 – Curva do sistema X curvas da bomba em diferentes rotações

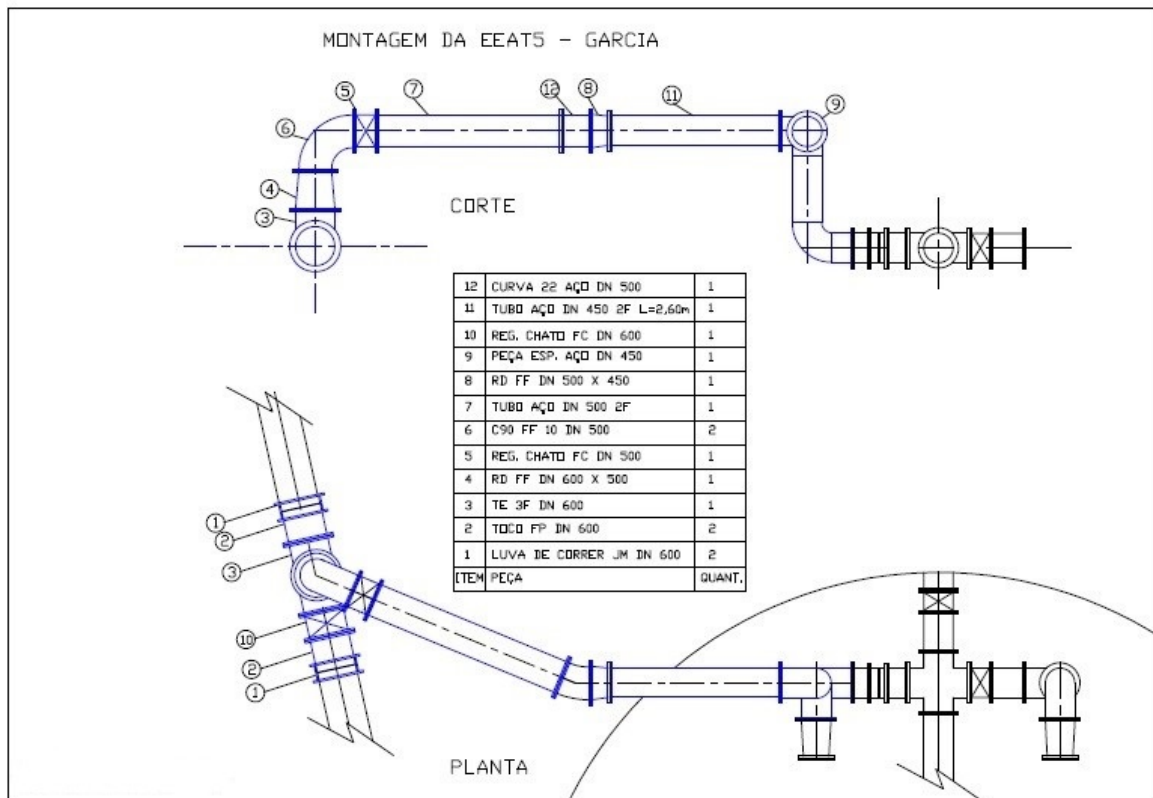


Fonte: dados da pesquisa

Concluimos, através dos cálculos e de dados obtidos em análises de campo, que a alteração na pressão da montante da bomba fez com que a altura manométrica de operação do conjunto necessária para vencer a coluna d'água passasse de 31 metros para 22 metros, possibilitando uma maior variação na velocidade de rotação do CMB.

Nas [Figura 8](#) e [Figura 9](#) estão os cortes lateral e superior da tubulação de by-pass e a imagem da tubulação real no local, construída para obter o aumento de pressão na montante da bomba.

Figura 8 – Cortes lateral e superior da tubulação de by-pass



Fonte: dados da pesquisa

Figura 9 – Tubulação de by-pass

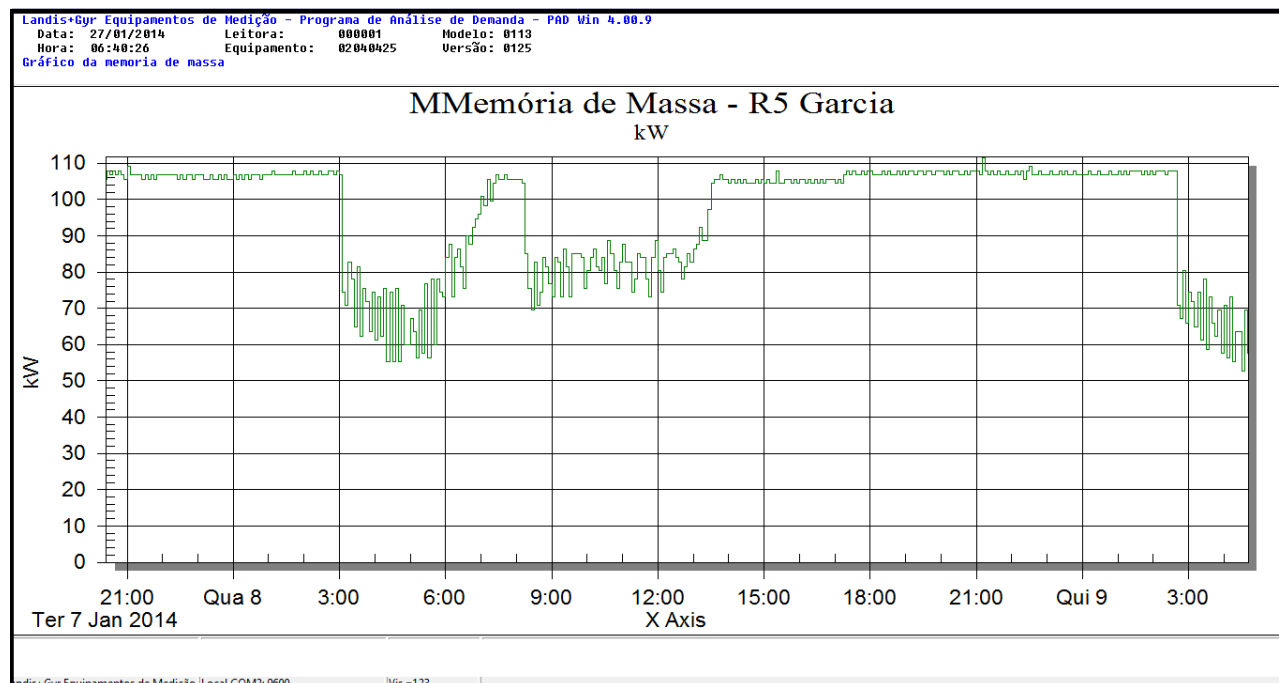


Fonte: dados da pesquisa

4 Resultados

Como observado nas Leis de similaridade, podemos quantificar o quanto é econômico alterar a velocidade de operação de uma bomba no sistema. O gráfico da [Figura 10](#) mostra uma análise efetuada na rede de alimentação elétrica da estação R5, apresentando os horários onde ocorrem variações no consumo de energia, deixando claro que na maior parte do dia o consumo adquire uma característica estável com pequenas variações e picos.

Figura 10 – Memória de massa da estação R5



Fonte: dados da pesquisa

Na [Tabela 4](#), referente ao histórico de consumo e à demanda da unidade R5, estão os valores registrados no período de dois anos que vai de 01 de abril de 2011 a 25 de abril de 2013. Destacando o período de instalação do inversor de frequência na unidade em julho de 2012, é possível observar a imediata alteração no consumo de energia e no valor total (localizado na última coluna à direita), nas linhas destacadas, que de R\$ 21.990,54 reduziu para R\$ 18.824,23. São exatos R\$ 3.166,31 de economia no primeiro mês de funcionamento do inversor.

De acordo com cálculos efetuados sobre os valores de consumo do sistema, obteve-se no período dos seis primeiros meses uma economia de R\$ 30.187,31.

5 Conclusão

O resultado se mostrou satisfatório, onde obteve-se um proveito melhor dos níveis de operação dos reservatórios e uma economia de energia bastante significativa.

É possível notar muitas vantagens na aplicação dessa tecnologia não somente em estações elevatórias de água. Em inúmeros sistemas que trabalham com motores elétricos, encontra-se a possibilidade de aprimorar seu processo com variações de velocidade durante o funcionamento de seus equipamentos. Em sistemas nos quais não seriam necessárias modificações estruturais, como ocorreu no abordado durante o estudo, o retorno financeiro poderia ser ainda mais rápido.

Tabela 4 – Histórico de consumo e demanda da unidade R5

Vencimento	Grupo tarifário	Leitura atual	Cons. (kWh) FP	Cons. méd.hor. (kWh/h) FP	Fator de carga (%) FP	Dem. FP (kW) FAT	Dem. FP (kW) REG	Dem. Ult (kW) FP	Cons. reat.exc. (kVARh) FP	Total (R\$)
26/04/13	Conv.	26/03/13	70910	92,33	82	120	112	0	50	16568,7
26/03/13	Conv.	22/02/13	61010	87,66	79	120	111,6	0	10	14999,95
26/02/13	Conv.	24/01/13	59730	85,82	77	120	111,2	0	10	19046,57
28/01/13	Conv.	26/12/12	60380	86,75	78	120	111,2	0	10	19516,07
26/12/12	Conv.	27/11/12	57630	82,8	76	120	109,6	0	230	19047,74
26/11/12	Conv.	29/10/12	56470	75,9	69	120	110,8	0	970	19003,12
25/10/12	Conv.	28/09/12	53890	74,85	67	120	111,2	0	1160	18350,65
26/09/12	Conv.	29/08/12	56720	73,85	66	120	111,6	0	1310	18824,23
27/08/12	Conv.	28/07/12	59550	82,71	63	131,6	131,6	11,6	680	21990,54
26/07/12	Conv.	28/06/12	56860	78,97	60	131,6	131,6	11,6	830	21752
26/06/12	Conv.	29/05/12	83580	108,83	82	132	132	12	40	26815,27
28/05/12	Conv.	27/04/12	78270	112,46	85	132,4	132,4	12,4	0	24216,28
26/04/12	Conv.	29/03/12	85290	114,64	87	132	132	12	0	25343,25
26/03/12	Conv.	27/02/12	79370	110,24	84	131,6	131,6	11,6	30	23858,35
27/02/12	Conv.	28/01/12	80460	111,75	85	130,8	130,8	10,8	0	23842,11
26/01/12	Conv.	29/12/11	83380	112,07	86	140	130,8	0	0	23338,68
26/12/11	Conv.	28/11/11	82970	111,52	85	140	131,2	0	0	23143,3
28/11/11	Conv.	28/10/11	80260	111,47	84	140	132,4	0	0	23017,74
26/10/11	Conv.	28/09/11	81460	113,14	84	140	134	0	0	23378,36
26/09/11	Conv.	29/08/11	90520	114,29	85	140	134	0	0	24431,23
26/08/11	Conv.	27/07/11	79860	114,74	84	140	136	0	0	22539,05
26/07/11	Conv.	28/06/11	84780	110,39	81	140	136	0	10	23573,97
27/06/11	Conv.	27/05/11	78140	112,27	83	140	135,2	0	0	22632,67
26/05/11	Conv.	28/04/11	80140	111,31	83	140	134,4	0	0	20858,91
Total de Registros:	24									

Fonte: dados da pesquisa

Há também algumas desvantagens relacionadas ao desgaste dos componentes elétricos dos motores devido à operação com variações de frequência, na prática, extremamente diferentes das quais foram projetadas. Como sugestão para trabalhos futuros, uma forma de saber mais detalhadamente o custo-benefício da implantação de inversores de frequência em um sistema é o estudo das alterações físicas dos componentes elétricos do motor e das consequências na vida útil do mesmo.

Por fim, é possível afirmar que para as necessidades do sistema estudado a implantação do inversor de frequência cumpriu com todas as expectativas, onde os objetivos específicos, educacionais e gerais foram alcançados.

REFERÊNCIAS

- BARRAL, Manuel F. *Perda de Carga*. 2011. Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Fernando/leb472/Aula_7/Perda_de_carga_Manuel%20Barral.pdf>. Acesso em: 06 de dezembro de 2018. Citado na página 12.
- CAPELLI, Alexandre. *Automação industrial: Controle do movimento e processos contínuos*. 2. ed., São Paulo: Editora Érica LTDA., 2011. Citado 4 vezes nas páginas 3, 4, 5 e 6.
- EPE. *Consumo de energia elétrica*. 2016. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 15 de abril de 2017. Citado na página 2.
- FILHO, Carlos Fernandes de Medeiros. *Notas de Aula - Saneamento Básico/ Engenharia Sanitária*. 2009. Universidade Federal de Campina Grande. Disponível em: <<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/>>. Acesso em: 10 de maio de 2017. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.
- FILHO, Paulo César Smith Freire. *Conversores de frequência no controle de nível de estações elevatórias de esgoto da RMS*. Monografia (Especialização em Automação, Controle e Robótica) — Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- NETTO, Azevedo; FERNANDEZ, Miguel ; et al. *Manual de hidráulica*. 8. ed., São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA., 1998. Citado na página 11.
- SILVEIRA, Leonardo; LIMA, Weldson Q. *Um breve histórico conceitual da Automação Industrial e Redes para Automação Industrial*. 2003. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <http://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA447/trabalho1/trabalho1_13.pdf>. Acesso em: 15 de maio de 2017. Citado na página 3.

Title - Benefits of using the frequency inverter in level control of water supply systems

Abstract – This article aims the application of frequency inverter in industrial processes that work with many starts and stops of pump sets in water supply systems, which do not have fixed consumption demand and have their equipment sized to support the most critical cases. The study was carried out at the Elevated Station of the Bahia Water Supply Company, in the neighborhood of Garcia, in the city of Salvador (Brazil), where the system was implemented. The application aims to acquire energy savings, better utilization of the level of operation of the pool and less wastage of the equipment involved in the system. The result was satisfactory. Despite the need for some structural changes in the process, the energy savings were easily demonstrated in the first month of implementation of the new system, bringing a financial return in a less than expected time and great savings in the coming periods.

Keywords – Energy efficiency; Frequency inverter; Water reservoir

Marcos Batista dos Santos, aluno de Graduação em Engenharia Elétrica na Devry Área 1 - Faculdade de Ciência e Tecnologia (2017). Artigo elaborado para o Trabalho de Conclusão de Curso, sob orientação do Prof. Msc. Alexandre Ribeiro, simplificado e adaptado para o formato da revista Mecatrone.