



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA EM
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM A UTILIZAÇÃO
DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA**

ARTHUR BRITO NUNES DINIZ

**JOÃO PESSOA
2017**

ARTHUR BRITO NUNES DINIZ

**REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA EM
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM A UTILIZAÇÃO
DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal da Paraíba, como um dos
requisitos para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes

JOÃO PESSOA
2017

D585r Diniz, Arthur Brito Nunes

Redução do consumo de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento de água com a utilização de inversores de frequência. / Arthur Brito Nunes Diniz. – João Pessoa, 2017.

45 f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Eficiência Energética 2. Sistemas de Abastecimento de Água 3. Inversor de Frequência I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 628.1(043)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas infinitas bênçãos derramadas sobre a minha vida. Por ter me sustentado e me guiado durante a realização deste curso, sempre me concedendo forças nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais, Laudízio e Roberta, pelo esforço e dedicação e por ser base incondicional em todas as etapas da minha vida. Aos meus irmãos Matheus e Ananda, sempre presente nos bastidores dessa caminhada, me incentivando e ajudando. À Anne, pela companhia especial ao longo do curso e por todo auxílio provido frente aos desafios encontrados.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes, pela atenção e por sempre deixar as portas abertas do LENHS - UFPB, proporcionando a oportunidade da realização não só desse trabalho, como de outros na condição de aluno de Iniciação Científica.

Aos integrantes do LENHS/UFPB, agradeço no nome do Dr. Moisés Menezes Salvino, pelo ensino com dedicação e paciência, representando contribuição ímpar para a realização desse trabalho.

Aos amigos e demais colegas de curso, pela vivência e constantes aprendizados compartilhados. Pelo enfrentamento em conjunto dessa longa caminhada, dividindo as dificuldades e as alegrias.

Aos demais professores e funcionários do curso de Engenharia Civil na UFPB, por fazerem parte dessa conquista através do exercício, com muito zelo e dedicação, dos seus valerosos ofícios.

RESUMO

O cenário dos sistemas de abastecimento de água no Brasil se mostra bastante ineficiente diante do crescimento populacional gradativo e da falta de investimentos na modernização do setor nos últimos anos. Além de apresentarem elevados índices de perdas de água (incluindo as perdas reais e aparentes) em suas redes de distribuição, as empresas de abastecimento convivem com altos custos energéticos devido a ineficiência operacional dos seus sistemas de bombeamento, gerando redução de faturamento e danos ambientais. Tradicionalmente no Brasil, o abastecimento é realizado utilizando Estação Elevatória com bombas de velocidade constante com a finalidade de recalcar a água para um Reservatório Elevado, que tem como função assegurar a pressão adequada na rede. Com o intuito de minimizar os custos envolvidos na construção e manutenção desses Reservatórios, bem como na adutora que o interliga com a estação elevatória, a literatura sugere introduzir um sistema de bombeamento direto com controle de vazão. Esse sistema pode ser alcançado pela introdução de válvulas à jusante da bomba, válvulas *by-pass* e a implementação de um sistema automatizado através do uso de inversores de frequência associado a um controlador inteligente que atue na velocidade de rotação do conjunto motobomba. Dessa forma, há um melhor controle do consumo energético e de água bem como das pressões de serviço. Neste trabalho é realizado o estudo da utilização do sistema de bombeamento direto em redes de abastecimento de água utilizando um sistema de controle PID para o controle de pressão de redes de distribuição de água, por meio de um conjunto motobomba acionado por inversor de frequência. Para isso foi utilizada uma bancada experimental instrumentalizada simulando um sistema de abastecimento real. A eficiência hidroenergética do sistema de bombeamento direto foi avaliada a partir de testes utilizando o cenário convencional (sem controlador) e empregando o sistema de controle em situações de máxima e mínima demanda. Também é feito um estudo de caso na Zona de Pressão do Reservatório R-11 com o intuito de atestar que a implementação do inversor de frequência pode gerar ganhos hidroenergéticos no sistema de abastecimento. Os resultados obtidos demonstraram êxito do sistema controlado frente ao convencional na medida em que o uso do controlador acoplado ao inversor de frequência proporcionou redução das pressões de serviço e do consumo de água pela rede. Os resultados também foram positivos para o estudo de caso, na medida em que houve economia de energia e reduções das pressões fornecidas.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Sistemas de Abastecimento de Água, Inversor de Frequência

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Exemplo de sistema de abastecimento de água com reservatório elevado..... | 9 |
| Figura 2 - Disposição de sistema de abastecimento de água sem reservatório elevado e com bombeamento direto para a rede..... | 9 |
| Figura 3 – Evolução histórica do Índice de Perdas na Distribuição..... | 12 |
| Figura 4 – Evolução do consumo e despesa com energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento. | 13 |
| Figura 5 – Sistema de bombeamento direto utilizando inversor de frequência para o abastecimento de água da zona alta da cidade de Lins/SP. | 16 |
| Figura 6 – Configurações antiga e atual da Estação Elevatória de Água de Santana..... | 17 |
| Figura 7 - Curvas características de uma bomba centrífuga..... | 19 |
| Figura 8 - Curva de consumo médio diário. | 20 |
| Figura 9 - Curvas características com controle de vazão e pressão através de válvulas. | 21 |
| Figura 10 - Funcionamento de válvula de <i>by-pass</i> | 21 |
| Figura 11 - Curvas características com controle de vazão e pressão através de <i>by-pass</i> | 22 |
| Figura 12 - Curvas características com controle de vazão e pressão através de inversor de frequência. | 22 |
| Figura 13 - Comparação entre os consumos de energia elétrica nos métodos de controle de vazão. | 23 |
| Figura 14 - Controle da pressão em sistema com inversor de frequência. | 26 |
| Figura 15 – Bancada experimental automatizada – LENHS/UFPB..... | 28 |
| Figura 16 - Atuação do controlador PID na rede experimental analisada..... | 30 |
| Figura 17 - Interface do supervisor no <i>software</i> LabVIEW®..... | 30 |
| Figura 18 – Localização da Zona de Pressão R-11. | 32 |
| Figura 19 – Planta do sistema de alimentação referente ao Reservatório Elevado R-11. | 33 |
| Figura 20 – Conjunto motobomba responsável pelo bombeamento direto e registro utilizado no controle da vazão. | 34 |
| Figura 21 – Modelagem hidráulica no EPANET da Zona de Pressão R-11. | 35 |
| Figura 22 - Gráfico comparativo das pressões de serviço..... | 36 |
| Figura 23 - Gráfico comparativo das vazões bombeadas..... | 37 |
| Figura 24 - Gráfico comparativo das potências consumidas pelo conjunto motobomba..... | 37 |
| Figura 25 – Padrão de consumo ao longo do dia pelo setor do reservatório R-11..... | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 26 – Pressão ao longo do dia no Nó N691 – Cenário 1 | 39 |
| Figura 27 – Pressão ao longo do dia no Nó N691 – Cenário 2 | 40 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Resultados obtidos para os sistemas simulados..... | 38 |
| Tabela 2 – Comparação os parâmetros e custos referentes ao bombeamento nos cenários simulados..... | 40 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 8 |
| 2 | OBJETIVOS | 11 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 12 |
| 3.1 | CENÁRIO DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL | 12 |
| 3.2 | CONSUMO E DESPESAS COM ENERGIA ELÉTRICA..... | 13 |
| 3.3 | AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA | 14 |
| 3.4 | ESTUDO DE CASOS – REESTRUTURAÇÃO FOCADA NA EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA | 15 |
| 3.5 | AUTOMAÇÃO E PID APLICADOS EM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA..... | 17 |
| 4 | METODOLOGIA..... | 19 |
| 4.1 | CONTROLE DA VAZÃO EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DIRETO | 19 |
| 4.2 | USO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA E AS LEIS DA AFINIDADE | 23 |
| 4.3 | REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA | 25 |
| 4.4 | ESTUDO EM BANCADA EXPERIMENTAL | 27 |
| 4.4.1 | Bancada Experimental Automatizada | 28 |
| 4.4.2 | Controlador PID e Supervisório <i>LabVIEW</i> [®] | 29 |
| 4.4.3 | Teste Realizado..... | 31 |
| 4.5 | SIMULAÇÃO HIDRÁULICA UTILIZANDO O <i>SOFTWARE</i> EPANET 2.0 | 31 |
| 5 | RESULTADO E DISCUSSÕES..... | 36 |
| 5.1 | BANCADA EXPERIMENTAL | 36 |
| 5.2 | SIMULAÇÃO HIDRÁULICA NO EPANET | 38 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 41 |
| 7 | REFERÊNCIAS..... | 42 |

1 INTRODUÇÃO

Os desenvolvimentos econômico e social nos diversos setores do mundo contemporâneo são fundamentados no emprego de alguns insumos indispensáveis, tal como a água. Ao mesmo tempo, sabe-se que a sua disponibilidade na natureza tem sido insuficiente para atender à demanda requerida em muitas regiões do planeta, fenômeno que vem se agravando crescentemente (HELLER, 2010). Nesse contexto, os sistemas de abastecimento de água devem, por função, atender as demandas dos diversos setores de consumo, sob vazões e pressões adequadas, sem comprometer o fornecimento do insumo em qualidade e quantidade. Nos últimos anos, além da eficiência hidráulica e sanitária, os fatores econômico e sustentável têm exercido maior influência no modo de dimensionar e gerir uma rede de distribuição de água.

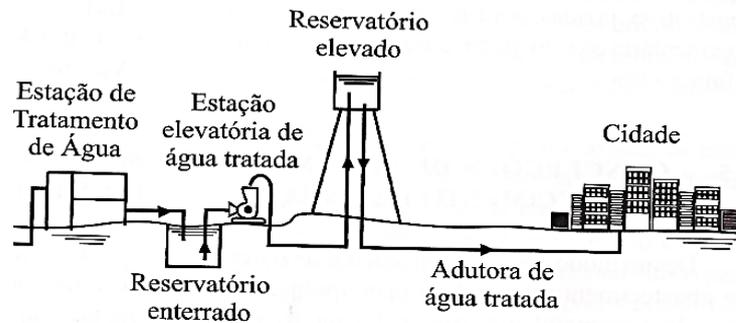
Os sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário demandam aproximadamente 3% do montante da energia consumida no mundo, sendo que, 90% desta parcela provem dos equipamentos e instalações de bombeamento (GOMES e CARVALHO, 2012). Além disso, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS/2015 (BRASIL, 2015), no Brasil foram produzidos e consumidos volumes de água de 15.381.099.000 m³/ano e de 9.723.650.000 m³/ano, respectivamente, o que resulta em 36,7 % de perda de água nos sistemas de abastecimento de água no território nacional.

Os elevados índices de perdas de água e consumo de energia elétrica apresentados pelas companhias de abastecimento reforçam a necessidade de adotar técnicas e implantar tecnologias que visam minimizar custos de implantação, operação e manutenção e reduzir desperdícios sem que haja o comprometimento da qualidade de suas atividades. Para James et al. (2002), o consumo de energia nos sistemas de abastecimento e esgotamento sanitário poderia ser reduzido em 25% em todo o mundo a partir de ações que visem implantar equipamentos e sistemas mais eficientes.

O fornecimento de água para a rede de distribuição é feito, tradicionalmente no Brasil, utilizando um reservatório elevado alimentado por uma estação elevatória com bombas operando com velocidade de rotação constante, como mostra a Figura 1. Em geral, constata-se que o reservatório elevado tem a atribuição principal de assegurar a pressão na rede, sendo o seu volume insuficiente para que lhe seja atribuída a finalidade de reservação. Além dessa metodologia convencional existem outras possibilidades de abastecimento da rede variando a quantidade, tipo e posicionamento do reservatório elevado. Entretanto desejando alcançar

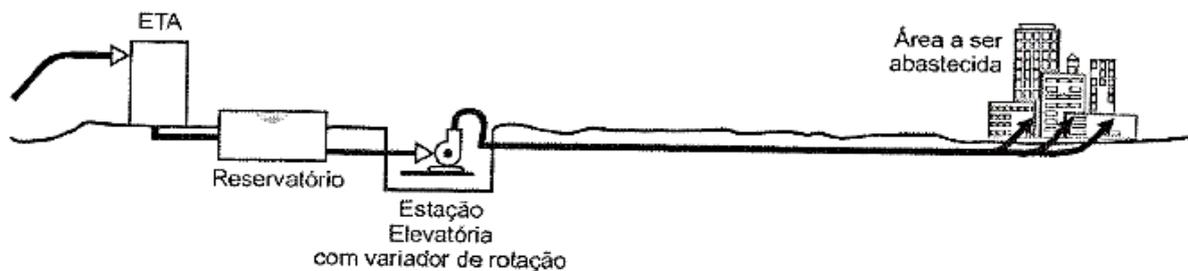
reduções no elevado custo associado a construção e manutenção do reservatório elevado, bem como na adutora que o interliga com a estação elevatória, é comum em algumas localidades, como a Europa e algumas regiões do Brasil, o bombeamento direto para a rede de distribuição de água, através da utilização de bombas com a variação da velocidade de rotação, eliminando-se o reservatório elevado (MESQUITA, 2007), como ilustrado na Figura 2.

Figura 1 - Exemplo de sistema de abastecimento de água com reservatório elevado.



Fonte: (TSUTIYA, 2007)

Figura 2 - Disposição de sistema de abastecimento de água sem reservatório elevado e com bombeamento direto para a rede.



Fonte: (TSUTIYA, 2007)

Nesse tipo de sistema, em que o bombeamento de água é realizado diretamente ao consumidor, torna-se necessário controlar a vazão em função da demanda. Uma das formas de atingir esse objetivo é controlando a pressão de um ou mais pontos do sistema. Caso esse controle não seja efetuado, à medida que a demanda aumenta, a pressão de descarga da bomba diminui, prejudicando os consumidores localizados em zonas altas do sistema. Entretanto, se a demanda for diminuída, a pressão da rede irá aumentar, provocando vazamentos na rede, pressões elevadas em áreas de cota baixa, comprometendo a resistência das tubulações.

O controle da vazão das bombas pode ser realizado a partir de modificações nas características do sistema de bombeamento através de manobras de válvulas. Enquanto que, com as alterações da curva característica da bomba, o controle da vazão pode ser feito por meio

da variação da rotação das bombas utilizando inversores de frequência acoplados a um sistema de controle inteligente.

Nesse sentido, os inversores de frequência são de fundamental importância. Estes dispositivos geram uma frequência e tensão trifásicas ajustáveis a fim de que seja possível controlar a frequência de operação de um motor de indução trifásico e, conseqüentemente, sua potência. Além disso, o inversor pode ser utilizado para a partida e parada suave do motor, pois aumentando ou diminuindo sua rotação através de uma rampa de aceleração, faz-se com que a corrente de partida ou parada possa ser controlada.

Segundo Tsutiya (2007), inversores de frequência consomem cerca de 2 a 6% da energia utilizada pelo sistema de bombeamento de uma rede e, o emprego adequado desses equipamentos ocasiona uma redução controlada da potência dos motores, que, de um modo geral, possibilita uma economia de energia elétrica de 10 a 50%.

A necessidade de otimização, portanto, implica ainda na implantação de técnicas computacionais durante a operação desses sistemas. Considerando a complexidade de uma rede de abastecimento de água, onde uma gama de decisões pode ser tomada em seu funcionamento, o empirismo dos técnicos responsáveis, evidenciado nas regras operacionais, contribui para a ineficiência hidráulica e energética. O avanço tecnológico, sobretudo na informática, tem auxiliado a engenharia de sobremaneira. Esse desenvolvimento permitiu, inclusive, a aplicação direta dessa ferramenta nos sistemas de abastecimento de água para o seu melhor monitoramento, controle e interferência das suas unidades em tempo real, que é o que sugere a automação.

Na literatura, pode-se encontrar alguns tipos de sistemas de controle aplicados tanto em sistemas industriais bem como em sistemas de abastecimento. O PID, por exemplo, é bastante difundido principalmente nas indústrias, devido a sua aplicabilidade em grande parte dos sistemas de controle além de ter um baixo custo e apresentar fácil implementação, como afirmam Salvino et al. (2014). Porém, é crescente seu uso no controle de válvulas proporcionais e sistemas de bombeamento com a finalidade de reduzir pressões excessivas e controle de surtos e flutuações abruptas de pressão na rede (QUADROS e PINTO, 2013).

2 OBJETIVOS

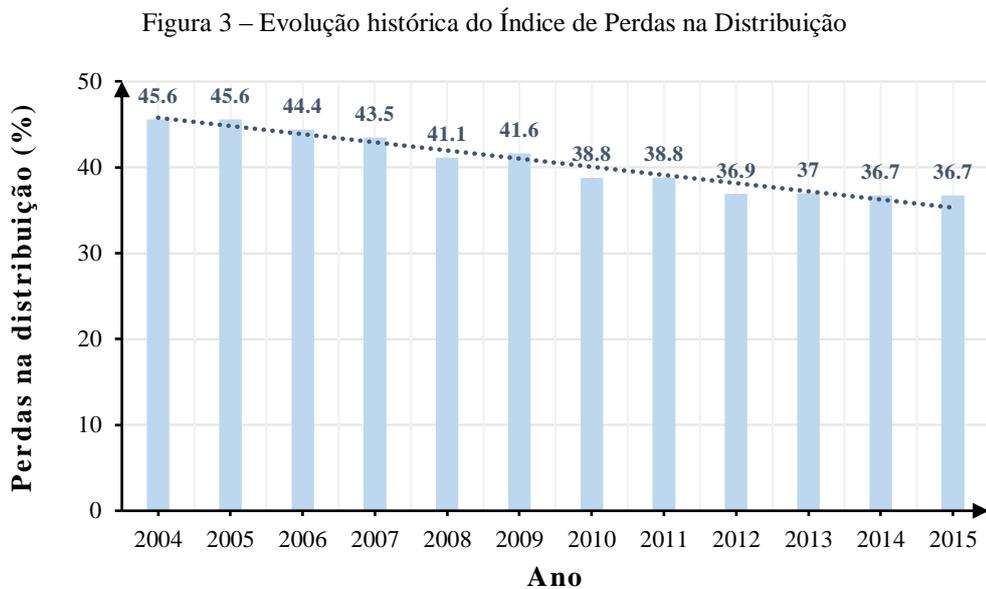
Este trabalho tem como objetivo analisar e discutir a utilização de sistemas de bombeamento direto com variadores de velocidade de rotação, como vetor na diminuição do consumo de água e energia elétrica em sistemas de distribuição de água. O estudo é feito a partir da simulação de um sistema de bombeamento direto através de uma bancada experimental instrumentalizada. Foi adotado como metodologia de controle o PID na sua forma convencional.

Uma análise secundária foi realizada através da simulação do comportamento hidráulico de um setor do sistema de abastecimento de água da cidade de João Pessoa – a zona abastecida pelo Reservatório R-11 - em *software* EPANET, avaliando os ganhos obtidos a partir da introdução do bombeamento variável frente a operação do sistema convencional dotado de bombeamento com velocidade de rotação fixa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CENÁRIO DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL

O cenário dos sistemas de abastecimento de água no Brasil se apresenta bastante ineficiente. De acordo com ABES (2013), a média brasileira de perdas de água é de aproximadamente 40% (incluindo as perdas reais e aparentes), atingindo, em alguns casos, valores superiores a 60%. Apesar de haver uma leve tendência de queda desses valores nos últimos anos (Figura 3), a situação ainda preocupa haja vista que muitas empresas ainda não medem as perdas de água de maneira consistente.



Fonte: SNIS (2004-2015) Adaptado

Em países desenvolvidos, como o Japão e Alemanha, as perdas atingem o valor médio de 11%, enquanto que na Austrália a média é de 16%. Desse modo, demonstra-se que ainda há grande espaço para mudanças no contexto brasileiro a partir de investimentos em melhorias na infraestrutura e mudanças na gestão do setor de abastecimento.

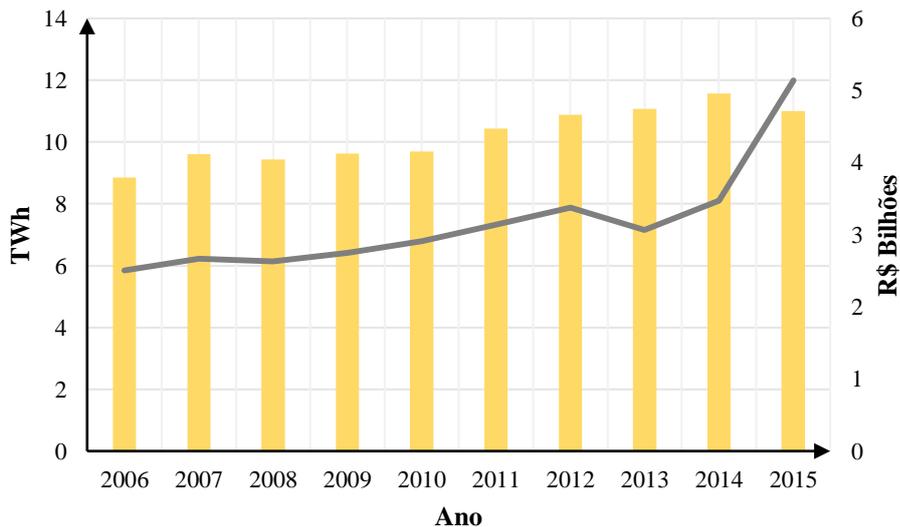
Essa situação é extremamente preocupante, já que são várias as suas implicações socioeconômicas. Além de reduzir a capacidade das empresas de saneamento de suprirem a demanda de água da população e indústrias, os elevados índices de perdas reduzem significativamente seus faturamentos, provocam danos ambientais e majoram a utilização de energia no bombeamento da água tratada, gerando custos adicionais por um insumo não consumido (BEZERRA e CHEUNG, 2013).

3.2 CONSUMO E DESPESAS COM ENERGIA ELÉTRICA

A partir de um entendimento econômico e financeiro, a ausência de eficiência energética compõe custos evitáveis que são suportados por subsídios à operação dos serviços e por taxas e tarifas cobradas dos usuários. Já sob uma perspectiva ambiental, o uso de energia sem considerações de eficiência contribui para a emissão de gases de efeito estufa desnecessários com impactos nas alterações climáticas em escala global. Inerente à abordagem da eficiência energética, inclui-se à temática das perdas de água, analisadas no capítulo anterior, uma vez que a energia utilizada na produção e transporte desse recurso desperdiçado também é perdida.

Com base nos dados coletados no SNIS, as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento participantes do SNIS atingiram R\$ 5,14 bilhões no ano de 2015, tendo sido consumidos 11,0 TWh com abastecimento de água, conforme apresentado na Figura 4. Este montante equivale ao consumo doméstico anual de cerca 17 milhões de habitantes e um aumento de quase 25% em relação a 2006, quando foram consumidos 8,86 TWh.

Figura 4 – Evolução do consumo e despesa com energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento.



Fonte: SNIS (2006 – 2015) Adaptado

A redução do consumo de energia em 2015, quando comparado a 2014, que era de 11,6 TWh, é atribuída sobretudo às medidas de racionalização do volume de água consumido adotadas em diversas localidades, motivadas pela crise hídrica nessas regiões. Apesar dessa redução, as despesas com energia tiveram um aumento substancial, de quase 50% em relação ao ano anterior. As principais justificativas para este aumento são os reajustes tarifários e a

implantação do sistema de bandeiras que entraram em vigor nesse período e reforçam a importância de uma adequada gestão energética por parte dos prestadores de serviço.

A verificação dos dados históricos do SNIS também permite observar a existência de uma tendência crescente de consumo energético no setor que geralmente acompanha os aumentos no consumo *per capita* e o atendimento com os serviços de água e esgotos. Entretanto, outros fatores, como a escassez hídrica ou o aumento do volume consumido, que influenciam a produção de água, podem causar impacto nestes indicadores. Ademais, o acréscimo da população residente torna necessário que as concessionárias aumentem o volume de água produzido e de tratamento de efluentes. É válido ressaltar a acrescência da relação entre o consumo de energia elétrica pelos sistemas de abastecimento e o consumo total do país, que avançou de 1,69% em 2006 para 2,82% em 2015.

3.3 AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA

O alto custo energético e a ineficiência operacional dos sistemas de abastecimento associado a crescente necessidade de preservação ambiental, têm gerado uma mudança na gestão das empresas responsáveis pela prestação desse serviço. A busca pela adoção de medidas que aumentem a eficiência energética tornou-se imperativa para o bom funcionamento das redes de abastecimento e diminuição dos custos operacionais (PROCEL SANEAR, 2012).

Dentre as ações que objetivam o melhor aproveitamento energético nos sistemas de abastecimento de água, Covas e Ramos (2007) destacam algumas medidas que apresentaram eficácia por meio de estudos previamente realizados, tais como: controle ativo de vazamentos; maior velocidade e melhor qualidade na reparação de danos nos sistemas e gestão da pressão por meio da utilização de bombas com velocidade de rotação variável (uso de inversores de frequência), válvulas redutoras de pressão e setorização da rede de abastecimento.

Os sistemas de abastecimento de água possuem alta variação da demanda de água, sob influência das condições climáticas, estações turísticas, atividades desenvolvidas na região abastecida, hábitos da população, etc. Assim, em casos em que a rede de abastecimento é dotada de um sistema de bombeamento direto, normalmente as bombas operam em rotação constante e para obter a variação da vazão, utilizam-se válvulas de estrangulamento na saída. Porém, controlar a velocidade de rotação do conjunto motobomba por meio do uso de inversores de frequência se mostra mais eficiente, já que a variação da vazão é diretamente proporcional a velocidade de rotação desse equipamento (GOMES, 2009).

Não obstante a utilização dos inversores de frequência terem aplicações típicas em sistemas de distribuição de água onde o bombeamento é feito diretamente na rede de distribuição (quando não existe reservatório de regularização), a utilização desses equipamentos já é uma realidade para o acionamento e controle de setores de abastecimento de água (BEZERRA, 2012).

Souza et al. (1969) fizeram uma análise dos aspectos técnicos e econômicos e destacaram o sucesso em diversos países dos sistemas de bombeamento direto nas redes de abastecimento de água através de bombas de velocidade variável sem reservatório de distribuição. Além disso para caracterizar as vantagens do sistema de bombeamento através de bombas de velocidade variável comparou-o com o sistema de bombeamento tipo “abastecimento em marcha”. Diante do estudo realizado, pode-se atestar a confiabilidade dessa técnica frente aos sistemas convencionais com torres de carga ou reservatórios. Além do aspecto técnico, pode-se destacar a grande economia proporcionada por este sistema (397%), visto que elimina a necessidade da construção de reservatórios elevados (instalações de alto custo) e destacou-se também que os equipamentos são simples podendo ser aplicados em comunidades de menores recursos técnicos.

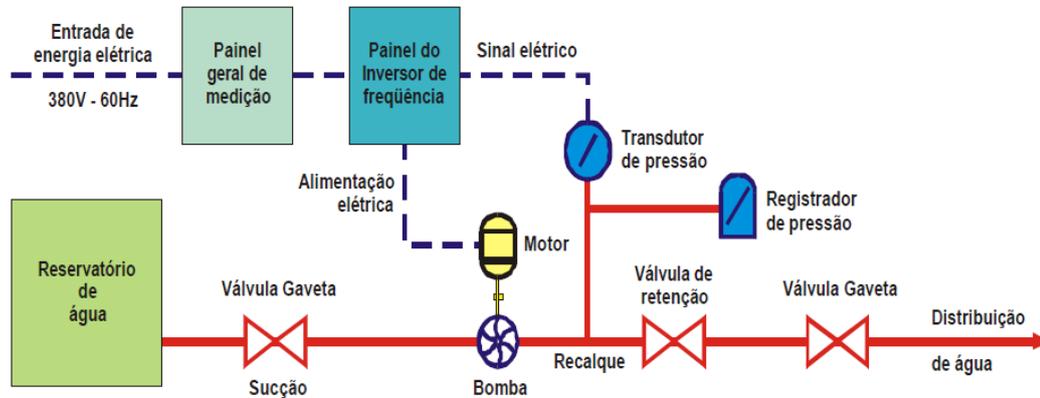
Marchi et al. (2012) fornecem uma ampla discussão sobre os sistemas de distribuição de água compostos por bombas com rotação variável, proporcionando uma visão sobre as formas de aumentar a eficiência de um determinado sistema, e dessa forma, garantir que o consumo de energia seja reduzido. A eficiência energética dessa técnica ficou comprovada sobretudo nos sistemas que possuem uma elevada variabilidade de condições de operações, de modo que as vantagens de se ajustar o ponto de operação da bomba podem ser plenamente exploradas.

3.4 ESTUDO DE CASOS – REESTRUTURAÇÃO FOCADA NA EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA

Cassiano Filho e Freitas (2001) realizaram um estudo comparativo da utilização de bomba de rotação constante e bomba com inversor de frequência no sistema de abastecimento de água da cidade de Lins (SP). Observa-se na Figura 5, o esquema do funcionamento do sistema de bombeamento direto na rede de abastecimento de água dessa cidade. Os resultados obtidos demonstraram que as alterações realizadas no sistema tornaram-no mais eficiente e viável do ponto de vista técnico e econômico, sobretudo pela diminuição do intervalo de variação da pressão. Verificou-se, entre outros, redução do consumo de energia elétrica em

38%, redução da demanda de energia em 12%, redução das perdas de água na rede de distribuição e retorno do custo da instalação do inversor de frequência em 2,5 anos.

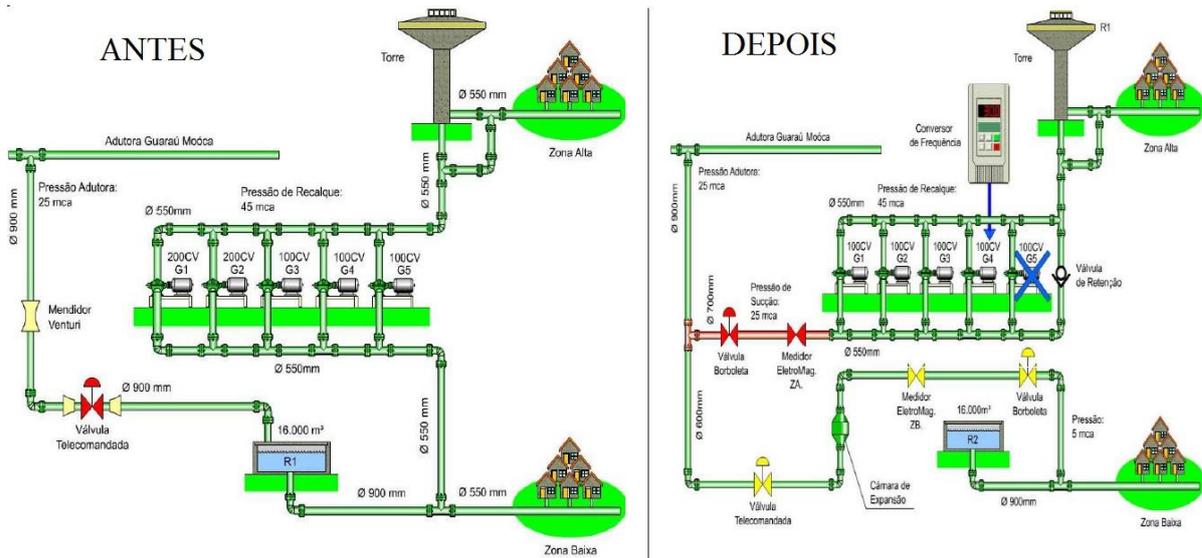
Figura 5 – Sistema de bombeamento direto utilizando inversor de frequência para o abastecimento de água da zona alta da cidade de Lins/SP.



Fonte: (TSUTIYA, 2007)

Braghiroli et al. (2011) destacaram a reestruturação focada na eficiência e otimização de processos do sistema de distribuição de água do bairro Santana localizado na zona norte de São Paulo. Em Abril de 2003, foi realizada análise através do banco de dados das contas de energia elétrica da Sabesp, que possibilitou a identificação de instalações cujo preço médio era superior aos valores aceitáveis para cada tipo de instalação. Constatou-se que a Estação Elevatória de Santana se enquadrava nesse perfil. Diante desse cenário, algumas propostas foram feitas no sentido de controlar e reduzir os custos operacionais, e dentre elas foi proposto a instalação de um inversor de frequência e três soft-starters para o abastecimento da zona alta, configurados para operar com a pressão da adutora e não mais pelo nível da torre. Pode-se observar, a partir da Figura 6, as intervenções realizadas na Estação Elevatória de Água de Santana.

Figura 6 – Configurações antiga e atual da Estação Elevatória de Água de Santana



Fonte: Adaptado (BRAGHIROLI et al., 2011)

Com a conclusão do projeto de eficiência energética, foram contabilizados ganhos técnicos, como a correção do fator de potência e redução do consumo de energia elétrica; ganhos ambientais, através da redução de 33% nas perdas reais de água do sistema e redução em 54% da demanda de energia pelo sistema de bombeamento; ganho social, admitindo-se que o volume de água referente a redução das perdas reais (341.026 m^3) pode agora abastecer mais de 20.000 famílias; ganhos econômicos, tendo em vista que o gasto médio mensal com energia elétrica foi reduzido de R\$56.600,00 para R\$28.000,00 e que o retorno do recurso investido se deu após quatro meses de operação do sistema implementado. Os ganhos vieram da economia no consumo de energia e na compra de água.

3.5 AUTOMAÇÃO E PID APLICADOS EM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Com o avanço da engenharia eletrônica foi possível a inserção da automação dos sistemas de abastecimento de água e esgoto sanitário. Embora esses equipamentos aumentem os custos do sistema, a comparação técnica-econômica entre a utilização ou não, normalmente leva a optar pelo uso desses equipamentos, pois diminui o custo do pessoal, reduz o consumo de energia elétrica e de produtos químicos, melhora a eficiência dos processos, aumenta a segurança na operação do sistema, etc. (SILVA; TSUTIYA, 2013).

Uma estratégia de controle amplamente utilizada em processos industriais é chamada de controlador de três termos ou controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) (OGATA,

2010). A popularidade desse algoritmo de controle pode ser atribuída ao seu desempenho robusto em uma ampla gama de condições de funcionamento e à sua simplicidade funcional.

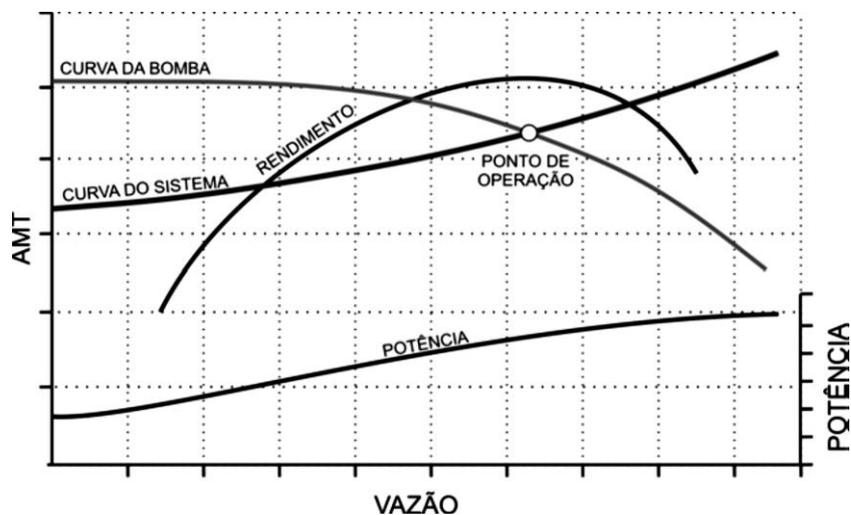
Salvino (2014) desenvolveu um controlador PID convencional, que foi implementado em uma bancada experimental que simula um sistema real composto por uma região de baixa e alta cotas topográficas. O funcionamento desse sistema dar-se através de bombeamento direto com uso de um conjunto motobomba e um *booster*, além de uma válvula proporcional. Os resultados mostraram que, dependendo do consumo, existe uma combinação dos elementos de controle que poderá proporcionar uma economia no consumo energético. Além disso, o controlador PID se mostrou eficiente no controle das pressões de serviço na entrada dos setores abastecidos.

4 METODOLOGIA

4.1 CONTROLE DA VAZÃO EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DIRETO

A princípio é importante entender que uma bomba é caracterizada pelos valores da sua vazão de operação (Q) e altura manométrica (H_m) correspondente. A união desses pares ordenados (Q, H_m) dá origem a curva característica da bomba, que juntamente com outras curvas, descritas em função da vazão, traduzem o seu funcionamento. A altura manométrica (H_m), quando escrita em função da altura geométrica da rede (H_g) e das perdas de carga ao longo das tubulações (Δh), representa graficamente a curva característica do sistema em que a bomba opera (ANDRADE FILHO, 2012). O ponto de intersecção dessas duas curvas fornece o valor de vazão e altura manométrica sob o qual o sistema deve trabalhar (Figura 7).

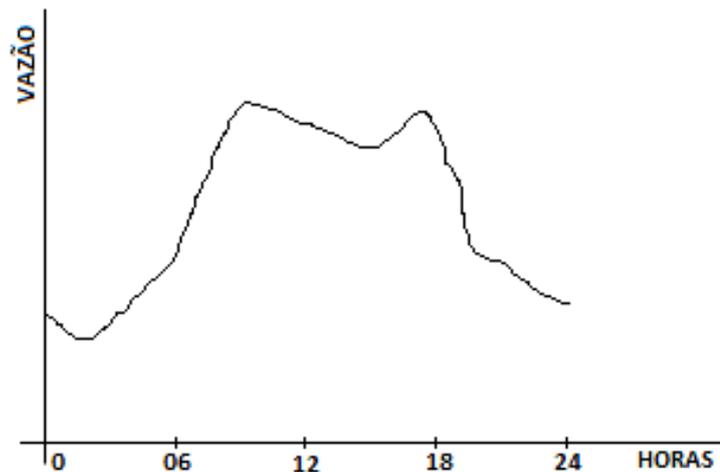
Figura 7 - Curvas características de uma bomba centrífuga.



Fonte: (ANDRADE FILHO, 2012).

Ao longo do dia a demanda de água varia continuamente, atingindo valores maiores no meio da manhã e menores de madrugada, como pode ser observado na Figura 8. Em um sistema convencional, a regularização da vazão, será feita pelo reservatório de distribuição que acumulará água durante as horas que a demanda for menor que a média e fornecerá água quando a vazão de demanda for superior à média.

Figura 8 - Curva de consumo médio diário.



Fonte: (GOMES, 2009)

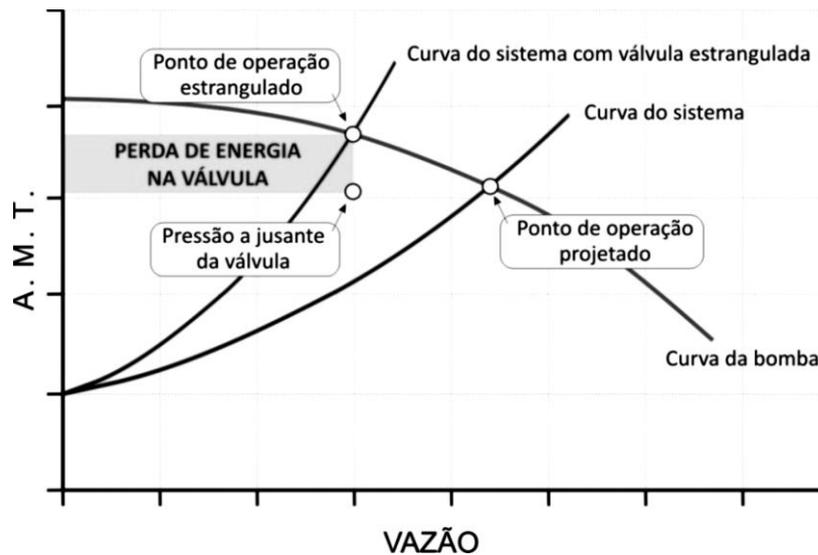
Quando o bombeamento de água é dirigido diretamente ao consumidor, torna-se necessário propor um mecanismo de controle da vazão e da pressão que são fornecidas a rede, a fim de evitar as faltas ou excessos. Deste modo, o ponto de operação em destaque na Figura 7 não se manterá fixo.

Usualmente, a regulação da vazão é obtida através de válvulas, as quais são manobradas de acordo com as necessidades operacionais de demanda. Podem ser utilizados ainda o *by-pass* e os variadores de velocidade de rotação da bomba.

A Figura 9 ilustra a operação de um sistema de bombeamento direto com controle da vazão/pressão através de uma válvula de manobra.

O fechamento da válvula gera uma perda de carga, deslocando a curva do sistema ao longo da curva característica da bomba, alterando conseqüentemente o ponto de operação. Nota-se que essa metodologia resultará em uma perda de energia na válvula, cujo excesso poderá gerar vibrações no conjunto motobomba e comprometer a vida útil dos equipamentos. Bezerra et al. (2012) fazem uma analogia desse método de controle da vazão à “*conduzir um carro com o freio de mão acionado*”.

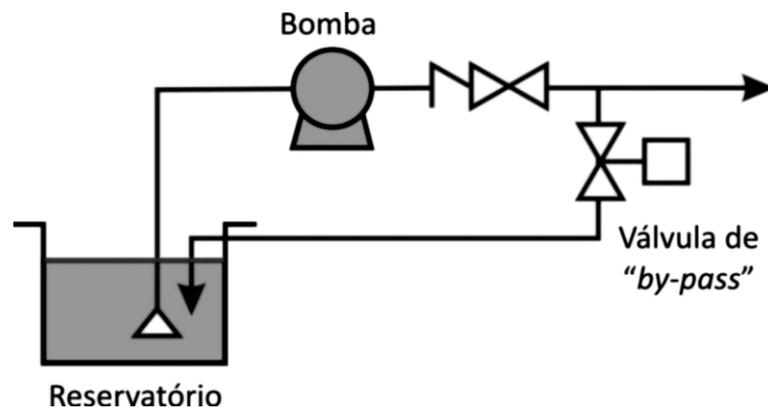
Figura 9 - Curvas características com controle de vazão e pressão através de válvulas.



Fonte: (BEZERRA, 2009)

Outra metodologia utilizada é o emprego de *by-pass* (Figura 10). Nesse caso, o controle da vazão é realizado utilizando uma linha de recirculação do fluido (*by-pass*), na qual existe um registro que permitirá aumentar a fluxo de água, isto é, parte da água que é bombeada não será utilizada e retornada ao local de sucção.

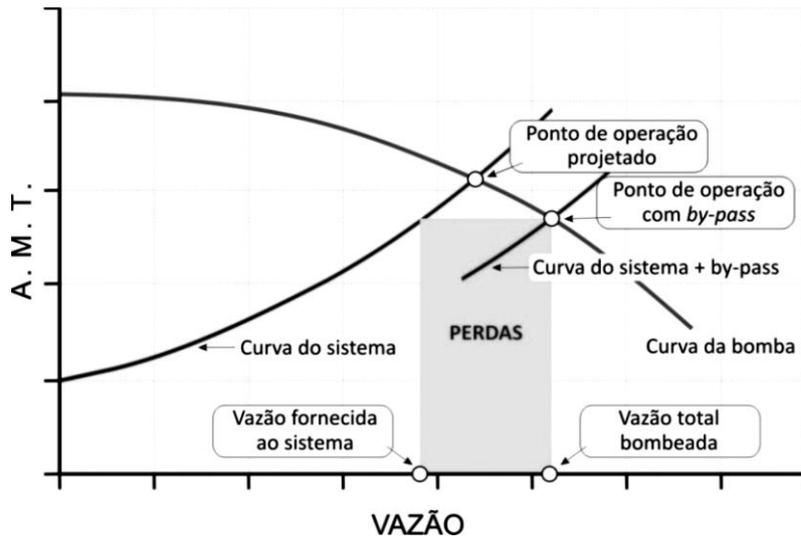
Figura 10 - Funcionamento de válvula de *by-pass*.



Fonte: (BEZERRA, 2009)

Desse modo, ocorrerá uma modificação na curva do sistema deslocando o ponto de operação, conforme mostrado na Figura 11. Percebe-se que esse artifício de controle também gera desperdícios, uma vez que a vazão total bombeada é superior a vazão efetivamente fornecida ao sistema. Apesar do desperdício observado, segundo Alé (2010), em sistemas onde a altura estática é dominante o controle por *by-pass* pode ser mais eficiente que a regulação por fechamento de registro ou por ajuste da rotação.

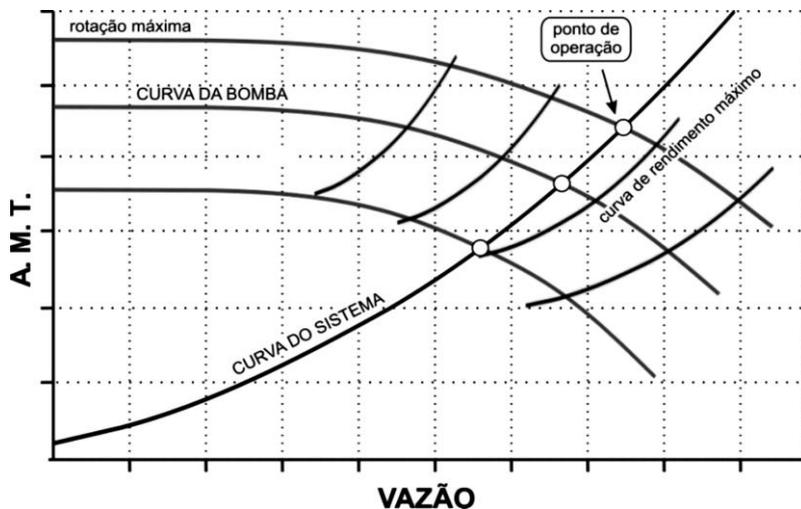
Figura 11 - Curvas características com controle de vazão e pressão através de *by-pass*.



Fonte: (BEZERRA, 2009)

A terceira metodologia proposta para o controle da vazão é àquela onde emprega-se inversores de frequência associados aos motores do conjunto motobomba. Analisando a Figura 12 percebe-se que nessa técnica de controle quem se movimenta é a curva característica da bomba e não a do sistema, surgindo assim, um novo ponto de operação com menores valores de vazão e altura manométrica, sem geração de perdas de energia adicionais (desconsiderando a energia necessária para utilização do inversor) ou bombeando de água em excesso.

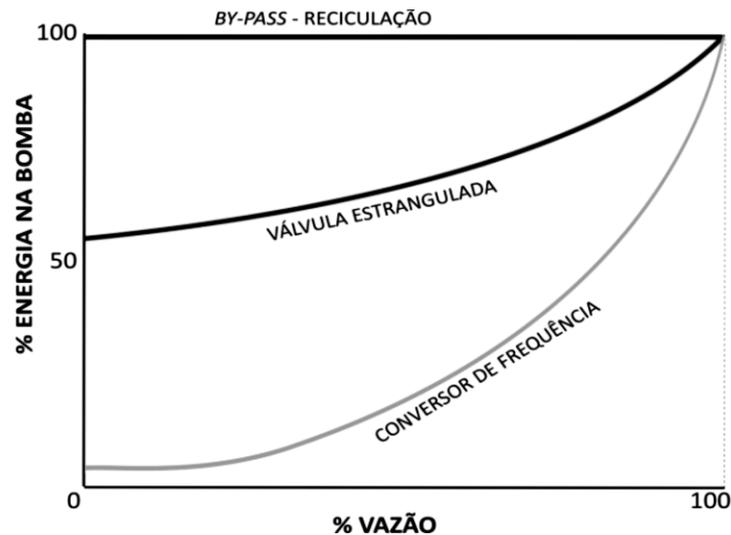
Figura 12 - Curvas características com controle de vazão e pressão através de inversor de frequência.



Fonte: (BEZERRA, 2009)

A Figura 13 apresenta um gráfico comparativo do gasto com energia elétrica para os métodos de controle de pressão/vazão apresentados.

Figura 13 - Comparação entre os consumos de energia elétrica nos métodos de controle de vazão.



Fonte: (BEZERRA, 2012)

Observa-se que utilizando 50% da vazão máxima disponível, o uso do by-pass manteria a bomba com 100% do consumo de energia elétrica, isto é, bombeia-se menos água, mas se gasta a mesma quantidade de energia, caso fosse bombeada a vazão máxima. A válvula estrangulada à jusante da bomba faria reduzir o consumo de energia em cerca de 40% e a aplicação do inversor de frequência juntamente ao conjunto motobomba garantiria a redução do consumo de energia elétrica consumida em cerca de 80%.

4.2 USO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA E AS LEIS DA AFINIDADE

Como pôde ser observado na Figura 12, a utilização de inversores de frequência em estações elevatórias permite variar a velocidade de rotação do conjunto motobomba, de acordo com a demanda de água exigida para a rede de abastecimento. Assim, visando minimizar o custo energético de bombeamento deve-se regular o sistema de forma a reduzir ao máximo a velocidade de rotação dos conjuntos de impulsão, sem comprometer as pressões nas diferentes zonas de consumo (CARVALHO, 2012).

Segundo Bezerra (2012), em geral, o inversor de frequência consome de 4 a 10% da energia absorvida para acionar o conjunto motobomba. Quando aplicado corretamente essas perdas tornam-se insignificantes se comparado com a redução do consumo de energia proveniente da operação da bomba operando com velocidade de rotação variável.

Aranto (2008) realizando estudo no laboratório da *Lappeenranta University of Technology*, investigou de que maneira quatro inversores de fabricantes diferentes

funcionariam como mecanismos de controle de sistemas de bombeamento. A partir dos resultados obtidos ele concluiu que o uso de inversores em frequência abaixo de 35 Hz deve ser evitado, uma vez que o rendimento assumirá valores baixos e que, aqueles com frequências maiores que esse valor, garantiriam ótimos rendimentos, proporcionando resultados satisfatórios quando da sua utilização.

Desse modo, realizando uma avaliação técnica adequada pode-se atestar que os inversores podem garantir aumento da confiabilidade do sistema e da vida útil dos equipamentos e economia de energia.

No esquema-exemplo da Figura 12, como já foi dito as diferentes vazões demandadas serão obtidas através da translação da curva da bomba. Para determinação do novo ponto de operação é de interesse conhecer a nova curva da bomba, esta pode ser obtida através da aplicação de equações denominadas Leis de Afinidade.

As leis de afinidade relacionam a velocidade de rotação da bomba (N) com a vazão (Q), a altura monométrica (H_m) e a potência motriz (P) e surgem através do estudo dos escoamentos semelhantes baseados no Teorema de *Buckingham*, o qual admite que uma bomba sempre será homóloga a ela mesma quando esta opera em velocidades de rotação distintas (MESQUITA et al., 2006). Isto posto, a partir do valor inicial e final de N é possível determinar o novo valor de Q, H_m e P, ao se aplicar as seguintes equações:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (3)$$

Onde os subscritos 1 e 2 referem-se às condições inicial e final de operação, respectivamente.

Os inversores de frequência provocam mudanças na rotação N do rotor, através da variação da frequência fornecida ao motor elétrico da estação elevatória. Nos motores assíncronos, a dependência da rotação N com a frequência f, sem levar em consideração o efeito do escorregamento, é dada pela relação:

$$N = \frac{120 \times f}{P} \quad (4)$$

Onde P é o número de pólos do motor AC.

4.3 REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA

Nas últimas décadas, com o avanço na engenharia eletrônica, foi possível o desenvolvimento de equipamentos sofisticados para serem utilizados na automação dos sistemas de abastecimento de água. Quanto maior o número de informações usadas pelo próprio sistema para análise e tomada de decisão, menor a participação do homem no processo a ser controlado. Em sistemas operados pela Sabesp, por exemplo, a automação das elevatórias fez reduzir os custos de energia elétrica em até 15% (TSUTIYA, 2008).

Em estações elevatórias que utilizam inversores de frequência, o uso de sistemas de controle automáticos possibilita manter a pressão de serviço sob um determinado valor fixo, independentemente das condições de abastecimento. O controle da pressão é sobremaneira importante nos sistemas onde a água é bombeada diretamente à malha de distribuição, pois mesmo que a demanda varie durante o dia, a pressão será mantida sob um valor mínimo, porém suficiente para servir a rede.

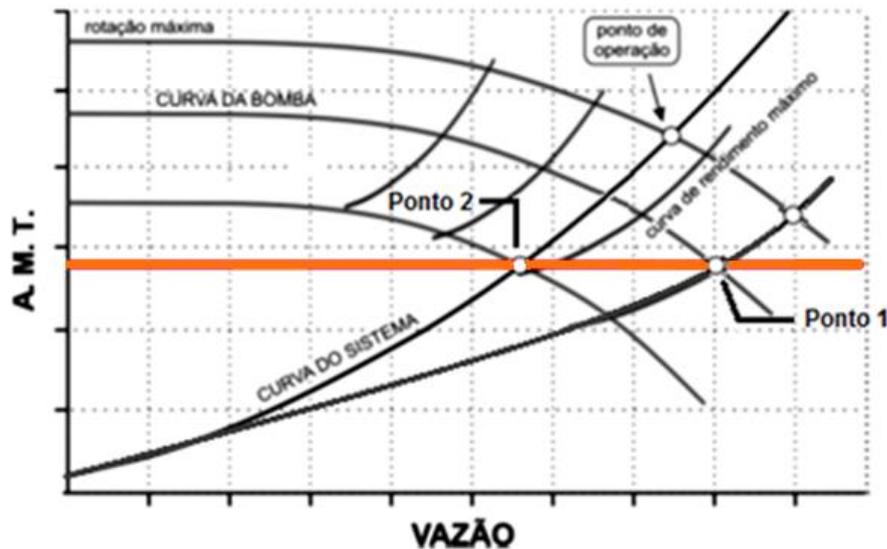
Segundo Gomes (2009), as pressões máximas na rede devem ser limitadas, pelos seguintes aspectos:

- a) Com maiores pressões requeridas, o custo energético de bombeamento aumentará já que esse custo é diretamente proporcional à altura manométrica;
- b) Para maiores pressões na rede, as tubulações serão mais caras por necessitarem de maiores pressões nominais;
- c) As possibilidades de ruptura nas tubulações aumentam com o aumento das pressões dinâmicas e estáticas na rede;
- d) As perdas reais de água crescem com o aumento da pressão de serviço, pois a vazão nas fissuras ou juntas dos tubos aumenta com o acréscimo de pressão;
- e) As vazões nos pontos de consumo crescem com o aumento das pressões.

A Figura 14 ilustra o funcionamento de um sistema hidráulico onde atua um controlador automático, cuja variável de controle é a pressão da rede. Para mantê-la sob P_{fixo} , independentemente da demanda de consumo, o sistema de controle envia sinais corretivos para

o inversor de frequência, que por sua vez adequa a velocidade de rotação do rotor, de forma que a pressão se mantenha inalterada para diferentes valores de Q.

Figura 14 - Controle da pressão em sistema com inversor de frequência.



Fonte: Adaptado (BEZERRA, 2009)

Na Figura 14, observa-se que para manter a pressão sob o valor de referência em resposta à mudança da demanda, o sistema de controle fez reduzir a velocidade de rotação do conjunto motobomba, o que gerou o abaixamento da sua curva característica (Ponto 1). Como consequência houve também uma redução do volume bombeado. Da mesma forma, no ponto 2 (período de menor consumo) a velocidade de rotação do conjunto foi reduzida, gerando assim uma nova curva da bomba. Percebe-se então que o inversor de frequência atua movimentando horizontalmente (ao longo de P_{fixo}) o ponto de operação do sistema, sobre um família de curvas, traçadas entre a demanda mínima ($Q_{mín}$) e máxima ($Q_{máx}$).

A potência elétrica média, em W, consumida por uma estação elevatória pode ser obtida através da expressão:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{\eta} \quad (5)$$

Sendo, γ o peso específico da água, em N/m^3 , Q a vazão bombeada, em m^3/h , H_m a altura manométrica do bombeamento, em mca, e η o rendimento global do conjunto motobomba, em decimal.

Assim, valores menores de vazão e alturas manométricas garantirão menor consumo de energia elétrica e conseqüentemente menores gastos por parte das companhias de abastecimento. Suponha-se uma companhia de abastecimento que, através da inserção de inversores de frequência nas estações de bombeamento, consegue reduzir a vazão bombeada e a altura manométrica em 15%, neste caso, têm-se:

$$C_{\text{com inversor}} = p(\text{kWh}) \cdot \frac{\gamma \cdot 0,85Q \cdot 0,85H_m}{\eta} \cdot \Delta t = 0,72 \cdot C_{\text{sem inversor}} \quad (6)$$

Desse modo, é possível garantir uma redução de 28% do consumo de energia elétrica. A longo prazo, a redução de gastos cobrirá os investimentos iniciais com os inversores de frequência e garantirá vantagens ao sistema abastecido, tais como redução de perdas de água por vazamentos, aumento da vida útil dos equipamentos e diminuição do consumo de água.

Os inversores de frequência podem ser gerenciados por sistemas de controle automático. A automação do processo é em um mecanismo robusto de monitoramento, em tempo real, possibilitando o controle acurado e a melhoria no desempenho das operações.

4.4 ESTUDO EM BANCADA EXPERIMENTAL

Com objetivo de atestar a redução do consumo de água e energia elétrica, a partir da variação da frequência, como apresentado no item 4.3, foram realizados testes em uma rede experimental.

Nesse contexto, foi simulada a operação de um sistema de bombeamento direto, utilizando um inversor de frequência, e comparada sua eficiência hidráulica e energética com um sistema no qual a vazão é regulada unicamente através de válvulas. Os testes foram realizados no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – LENHS na Universidade Federal da Paraíba.

No caso de um sistema de bombeamento indireto, a regularização da vazão horária é feita pelo reservatório de distribuição, assim a vazão bombeada e a pressão fornecida será constante ao longo do tempo de utilização e seus valores são função da vazão máxima diária do sistema e da altura geométrica do reservatório elevado.

4.4.1 Bancada Experimental Automatizada

A bancada experimental automatizada (Figura 15) é um sistema que simula um sistema de abastecimento real e é dotado com os componentes necessários para o seu bom funcionamento. Por se tratar de um modelo experimental foi concebida como um circuito fechado, onde seu ponto de descarga (ponto de consumo) tem ligação com o reservatório que abastece o sistema. A bancada experimental se localiza no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba – LENHS/UFPB.

Figura 15 – Bancada experimental automatizada – LENHS/UFPB



Fonte: Própria

A priori, o escopo da rede experimental automatizada é simular um sistema de distribuição de água setorizado composto por uma zona de consumo (zona alta) cujo ramal de descarga possui cota topográfica desfavorável. Para os fins propostos no presente trabalho, a análise do sistema operando com apenas essa zona de consumo é suficiente. Ademais, o sistema é composto por duas bombas em paralelo, porém, o estudo será feito utilizando o sistema de bombeamento dotado apenas de um conjunto motobomba, o que não trará prejuízos as conclusões do trabalho.

4.4.2 Controlador PID e Supervisório *LabVIEW*[®]

A lógica PID consiste no cálculo de um valor de atuação sobre o processo, a partir das informações do valor desejado e do valor de saída da variável controlada. Este cálculo baseia-se na composição de três ações distintas: correção proporcional ao erro (P), correção proporcional ao produto erro versus tempo (I) e a correção proporcional à taxa de variação do erro (D).

Astrom e Hagglund (1995) intitulam como a versão acadêmica do controlador PID, a expressão matemática, no domínio do tempo, apresentada na Equação 7.

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_P \cdot \mathbf{e}(t) + \mathbf{K}_I \cdot \int_{t_0}^t \mathbf{e}(t) + \mathbf{K}_D \cdot \frac{d}{dt} \mathbf{e}(t) \quad (7)$$

Onde, $u(t)$ é um valor de atuação sobre o processo, $e(t)$ é o erro entre o valor desejado e o valor de saída da variável do processo, K_P é o ganho proporcional, K_I é o ganho integrativo e K_D é o ganho derivativo.

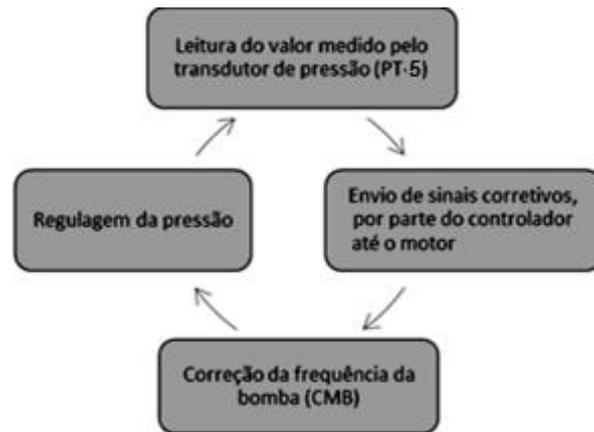
Cada parcela da Equação 7 atua de maneira específica sobre o erro $e(t)$. O controlador proporcional ($K_P \cdot e(t)$) tem como característica alterar o valor da saída linearmente com o sinal de erro. Esta ação é intuitiva e simples, assemelhando-se ao comportamento humano: sempre que se está longe do objetivo faz-se um ajuste maior, e quando se chega perto do alvo, um passo menor é dado (YU, 2006).

A ação isolada do controlador proporcional é incapaz de fazer com que a variável do processo retorne ao valor desejado, gerando um erro em regime permanente. Desta forma, para corrigir e otimizar o controlador proporcional podem ser utilizadas as ações integral e derivativa.

A principal característica da ação integral ($K_I \cdot \int_{t_0}^t e(t)$) é a eliminação do erro em regime permanente. Já a ação derivativa ($K_D \cdot \frac{d}{dt} e(t)$) proporciona a diminuição do tempo de estabilização, minimiza a variação do erro de regime estacionário e restringe elevações maiores do sobressinal (DUARTE FILHO, 2014).

A Figura 16 a seguir apresenta de forma resumida como o controlador PID atua na rede experimental analisada.

Figura 16 - Atuação do controlador PID na rede experimental analisada.



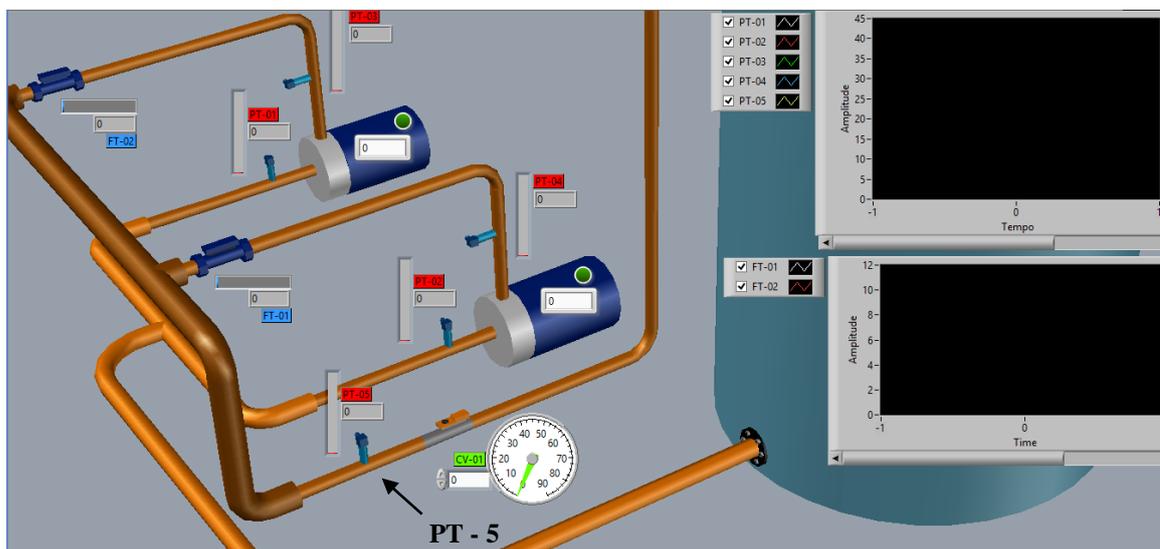
Fonte: Própria

Esse ciclo será continuamente feito até que a pressão no ponto desejado se mantenha constante, independente de perturbações ocorridas no sistema.

Para permitir a aquisição de dados e a integração entre o sistema de controle e a bancada experimental foi utilizado o sistema supervisório desenvolvido através do *software* LabVIEW® (*Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*), como mostrado na Figura 17.

O LabVIEW® utiliza uma linguagem de programação predominantemente visual desenvolvida pela National Instruments (NI), conhecida por Linguagem G. A mecânica de programação deste *software* difere das linguagens usuais, pois incorpora um compilador gráfico aperfeiçoado para maximizar o desempenho do sistema, ao invés de utilizar as tradicionais linhas de código.

Figura 17 - Interface do supervisório no *software* LabVIEW®.



Fonte: Própria

4.4.3 Teste Realizado

O teste proposto consiste na simulação de dois cenários de operação, o primeiro reproduz em escala reduzida um sistema de bombeamento direto, no qual o controle da vazão ocorrerá apenas através de válvulas localizadas na saída dos trechos finais da rede. Nesse caso, a bomba terá frequência constante de 60 Hz, correspondente a frequência padrão da rede elétrica brasileira.

Já o segundo sistema simula uma estação elevatória automatizada, na qual associado ao motor tem-se um inversor de frequência, que regulará a vazão em função de um valor fixo de pressão que deve ser mantido, ao longo do tempo.

De acordo com a norma técnica NBR 12218 referente ao projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público, a mínima pressão dinâmica exigida na malha de distribuição deve ser de 10 mca. Desse modo, para os testes realizados definiu-se que, independente da demanda de água requerida a pressão na seção onde se localiza o transdutor de pressão PT-5, deve se manter inalterada e igual ao valor mínimo recomendado pela norma. O ponto PT-5 foi escolhido para o monitoramento da pressão, pois é o local de leitura de pressão mais próximo à zona de descarga da rede.

Em ambos os sistemas foram coletados dados de vazão, pressão e potência elétrica referentes a dois instantes: um de demanda máxima, no qual a válvula CV-1 foi adotado um ângulo de fechamento de 15° e outro de demanda mínima, com a válvula CV-1 com 60° de ângulo de fechamento.

Os dados de vazão, pressão e potência foram obtidos a partir *software* LabVIEW®.

4.5 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA UTILIZANDO O *SOFTWARE* EPANET 2.0

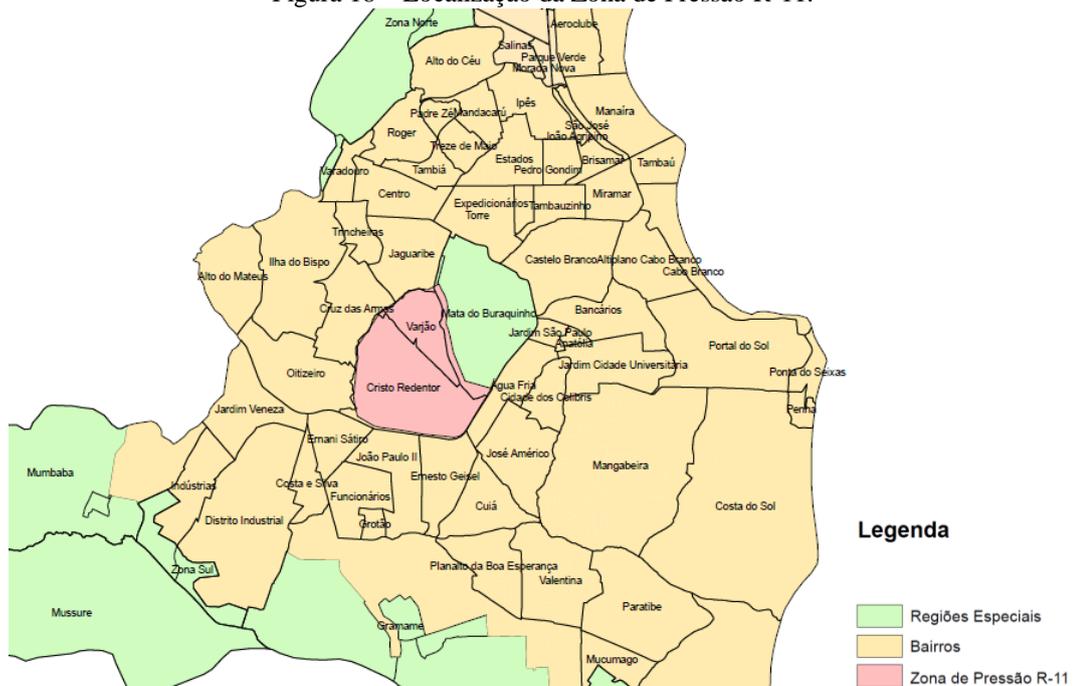
A simulação hidráulica no software EPANET 2.0 foi realizada com o propósito de fazer um paralelo entre a operação de um sistema de bombeamento direto dotado de bomba com velocidade de rotação fixa e o mesmo sistema sendo abastecido através de um bombeamento com rotação variável. Dessa forma, é possível visualizar o ganho hidroenergético e o comportamento no sistema ao introduzir o princípio do controle da velocidade de rotação do sistema de impulsão.

O EPANET é uma ferramenta computacional desenvolvida para simular estática e dinamicamente o comportamento hidráulico e a qualidade da água em redes de distribuição pressurizadas. O programa permite a criação de vários cenários diferentes, podendo ser

constituído por rede de tubulações (malhada ou ramificada), estações de bombeamento, diversos tipos de válvulas e reservatórios de nível fixo e variável. A partir da simulação, o EPANET possibilita o usuário obter valores de pressão nos nós, vazão nas tubulações, altura de água nos reservatórios de nível variável, entre outros.

O estudo foi feito na Zona de Pressão do Reservatório R-11, que é um setor do sistema de abastecimento da cidade de João Pessoa, localizado nos bairros Cristo Redentor e Varjão (Figura 18).

Figura 18 – Localização da Zona de Pressão R-11.



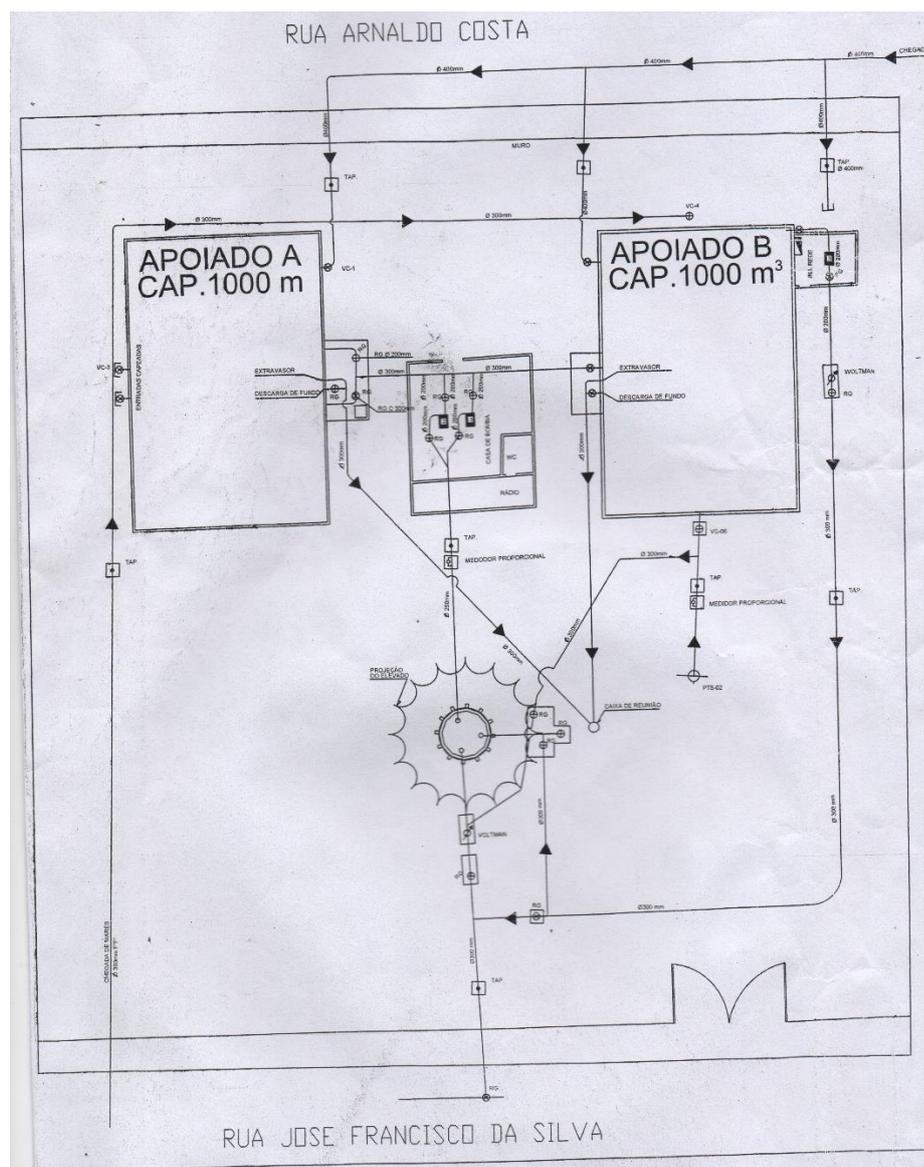
Fonte: CAGEPA - Adaptado

Na sua concepção, na década de 70, o reservatório elevado R-11 era responsável pelo abastecimento dos bairros Cristo e Varjão, sendo suficiente para o fornecimento das vazões e pressões demandadas por essa região. De maneira geral, o sistema era composto por dois reservatórios apoiados, ambos com capacidade de 1000 m³ e interligados por uma tubulação para o funcionamento dos reservatórios como vasos comunicantes, e os quais eram alimentados pelas adutoras de Marés e Gramame; Reservatório Elevado, que possui uma altura de aproximadamente 20 metros (volume não consta nos registros técnicos da concessionária); estação elevatória dotada de dois conjuntos motobombas operando em paralelo com o objetivo de alimentar o Reservatório Elevado.

Com o passar dos anos, a expansão urbana e, conseqüentemente, o aumento no número de residências e comércios, geraram o aumento da demanda de água requerida, tornando

necessária a adoção de medidas reestruturantes na alimentação da rede de distribuição desses bairros. Dessa feita, foi implementado um conjunto motobomba adjacente ao reservatório apoiado B (Figura 19) para o bombeamento de água direto na rede de distribuição. Segundo informações concedidas pelo Agente Operacional desse setor, o novo equipamento opera sem interrupção e sem controle da velocidade de rotação e que, quando necessária diminuição da vazão bombeada, o controle é feito introduzindo perda de carga no sistema através de um registro (Figura 20).

Figura 19 – Planta do sistema de alimentação referente ao Reservatório Elevado R-11.



Fonte: CAGEPA

No que concerne ao Reservatório Elevado, a única alteração operacional é realizada durante a madrugada, período de menor demanda, quando apenas uma das bombas da estação elevatória recalcam água para sua alimentação.

Apesar de já ter passado por restauração desde a sua concepção, o Reservatório Elevado R-11 já se mostra bastante deteriorado, apresentando desprendimentos de pedaços de concreto da sua laje, sendo, portanto, necessária restauração a curto/médio prazo.

Figura 20 – Conjunto motobomba responsável pelo bombeamento direto e registro utilizado no controle da vazão.



Fonte: Própria

A modelagem hidráulica no EPANET desse setor (Figura 21) foi fornecida pela CAGEPA e é fruto de um trabalho de consultoria realizado pela empresa HIDRAINFO que teve como objetivo a setorização do sistema de abastecimento de água da cidade de João Pessoa e Cabedelo. A partir dessa modelagem, serão feitas simulações considerando a desativação do Reservatório Elevado e a implementação de uma bomba que atenda a vazão e altura manométrica demandada pelo sistema atual. Foi introduzido um padrão de consumo representando a variação da demanda ao longo do dia. As simulações foram realizadas para o período de vinte e quatro horas e seguindo a metodologia de dois cenários:

- Cenário 1 – Bombeamento direto sem variação da velocidade de rotação do conjunto motobomba;

- Cenário 2 – Bombeamento direto com a implementação de um inversor de frequência com o objetivo de variar a velocidade de rotação do conjunto motobomba de acordo com a demanda requerida. Foi escolhido o nó mais desfavorável (N691) para controlar a pressão em 10 m.c.a (mínimo definido pela ABNT 12218).

A comparação dos resultados referentes aos dois cenários foi feita a partir de um referencial em comum: o nó mais desfavorável do setor estudado (N691). A análise foi feita a partir da avaliação da variação da pressão nesse nó ao longo de vinte quatro horas, bem como do custo energético considerando a modalidade tarifária convencional (baixa tensão) da Energisa/PB para a classe “Serviço Público”, que de acordo com a concessionária é de R\$ 0,37422/KWh.

Figura 21 – Modelagem hidráulica no EPANET da Zona de Pressão R-11.



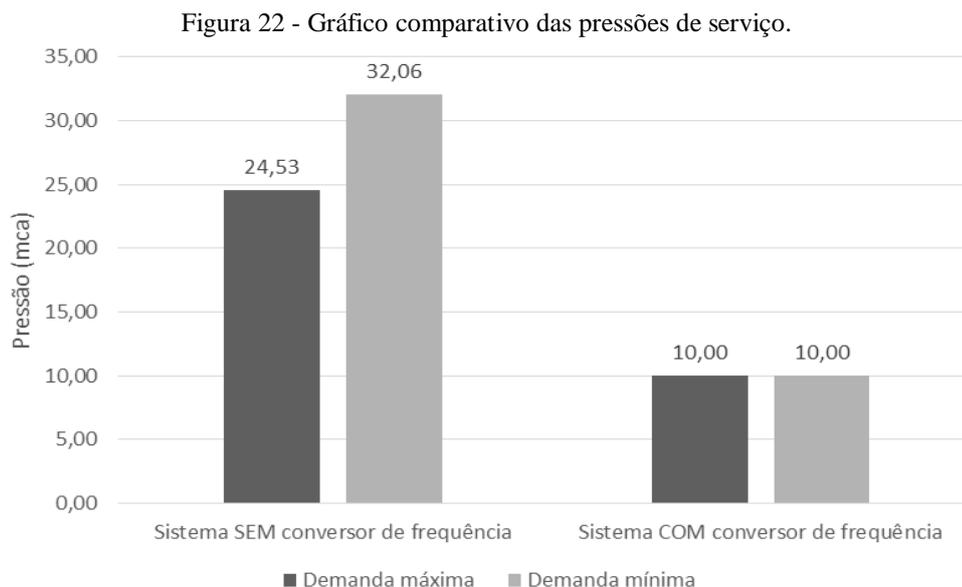
Fonte: CAGEPA

5 RESULTADO E DISCUSSÕES

5.1 BANCADA EXPERIMENTAL

Como foi explicado no item 4.2, ao reduzir o número de rotações do conjunto motobomba, aplicando as Leis de Afinidade, constatou-se que também serão reduzidas as vazões, pressões e potência do conjunto motobomba (Equações 01, 02 03, respectivamente). Nos gráficos apresentados abaixo constatou-se experimentalmente a redução esperada desses parâmetros.

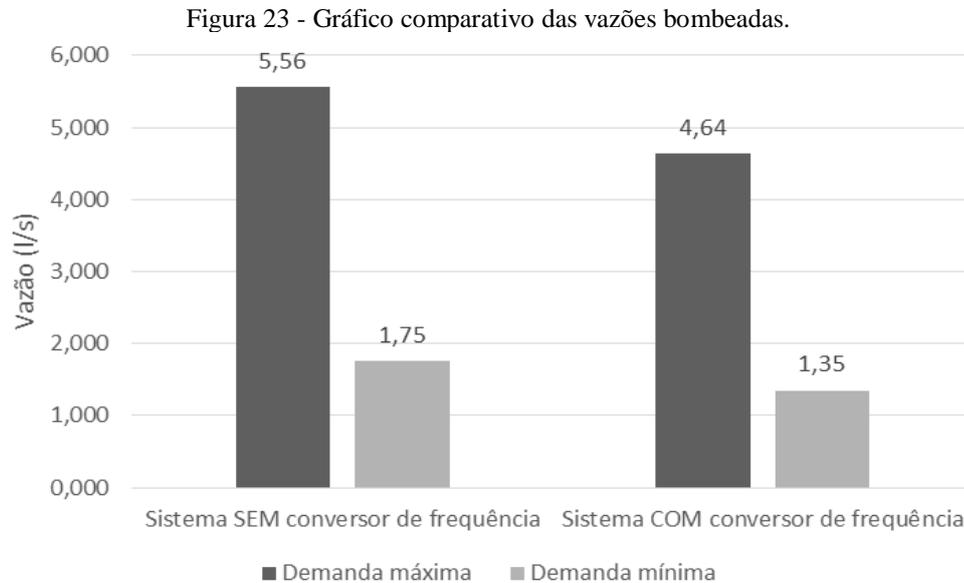
O gráfico da Figura 22 apresenta o comparativo das pressões de serviço obtidas no instante de consumo máximo e mínimo, nos sistemas com e sem inversor de frequência. Enquanto o sistema regulado pelo inversor manteve as pressões de serviço fixas, tanto no período de maior, quanto no de menor consumo, o sistema sem inversor garantiu a demanda de consumo requerida, porém aumentando ou diminuindo a pressão de serviço. Nesse sistema, durante o período de menor demanda o aumento de pressão, comparado a rede automatizada, foi de 220,6%. Tais pressões excessivas contribuem para vazamentos nas juntas, desgaste das tubulações e aumento do consumo de água.



Fonte: Própria

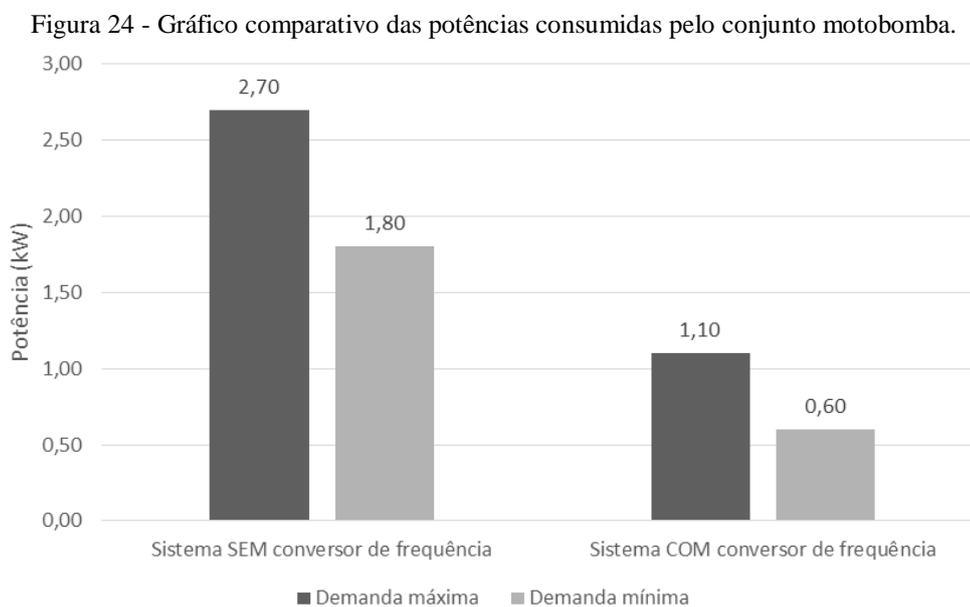
O gráfico da Figura 23 mostra a esperada redução no consumo de água, quando se utiliza o inversor de frequência. O que, ao contrário do que pode aparentar, não irá comprometer o

abastecimento da população consumidora, uma vez que o sistema será dimensionado considerando a máxima vazão horária da rede.



Fonte: Própria

O gráfico da Figura 24 compara as potências elétricas consumidas pelo conjunto motobomba nos cenários propostos. Como já era esperado houve uma considerável redução na potência utilizado no sistema com inversor de frequência, o que resultará em consumos menores de energia elétrica e conseqüentemente menores gastos por parte das companhias de abastecimento.



Fonte: Própria

A Tabela 1 traz de forma resumida os dados coletados durante os testes.

Tabela 1 – Resultados obtidos para os sistemas simulados.

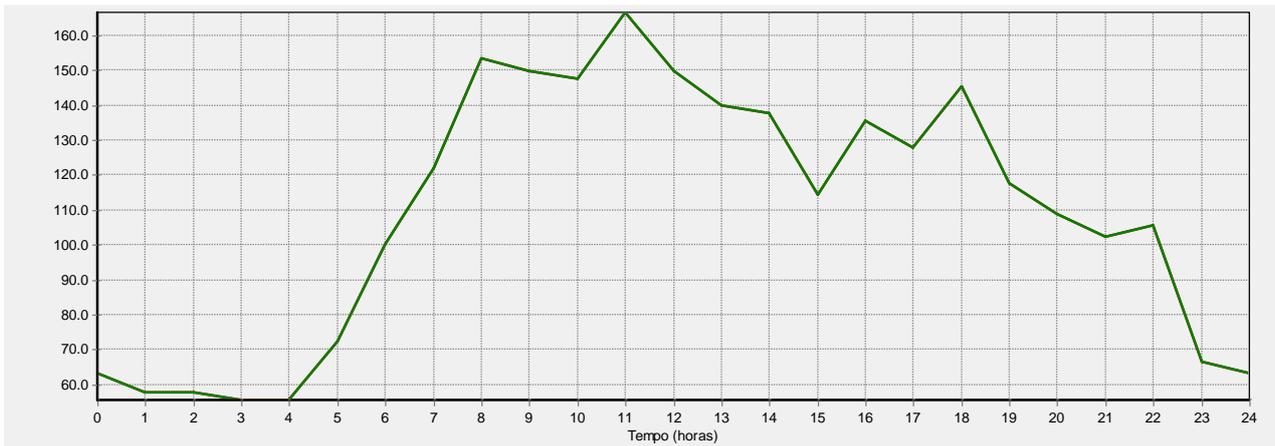
| Parâmetros | Demanda | Rotação | |
|-------------------------------|---------|-----------|----------|
| | | Constante | Variável |
| Vazão (l/s) | Máxima | 5,563 | 4,636 |
| | Mínima | 1,753 | 1,349 |
| Pressão de recalque (m.c.a) | Máxima | 24,525 | 10,000 |
| | Mínima | 32,058 | 9,999 |
| Potência (kW) | Máxima | 2,700 | 1,100 |
| | Mínima | 1,800 | 0,600 |
| Frequência do motor (Hz) | Máxima | 60,000 | 43,529 |
| | Mínima | 60,000 | 37,141 |
| Válvula de regulação da vazão | Máxima | 30,000 | 30,000 |
| | Mínima | 70,000 | 70,000 |

Através dos dados obtidos contata-se a eficiência da utilização de sistemas de bombeamento direto com inversores de frequência na redução das pressões, vazões e potências consumidas, quando comprado a um sistema no qual controle da vazão ocorre apenas por meio válvulas.

5.2 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA NO EPANET

O padrão de consumo de um dia (demanda diária de água requerida pelo setor) utilizado nas simulações, pode ser observado na Figura 25. Os dados empregados na construção desse modelo provêm de macromedição localizada a jusante das unidades de abastecimento da rede de distribuição de água da Zona de Pressão do R-11. É possível constatar que o período de menor demanda se encontra entre as 2 h e 4 h da madrugada e o horário de maior demanda às 11 h.

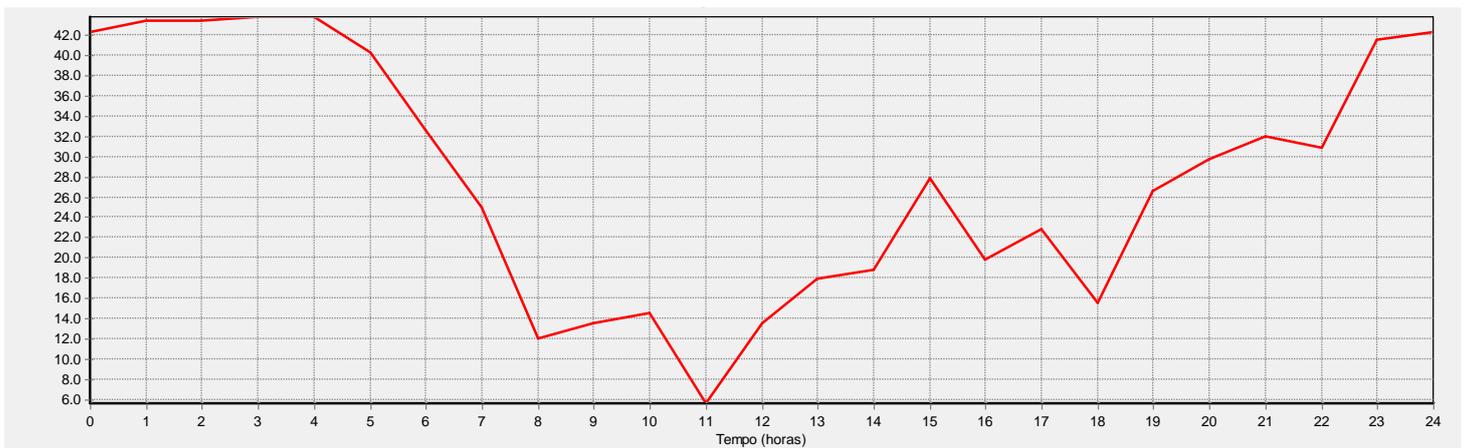
Figura 25 – Padrão de consumo ao longo do dia pelo setor do reservatório R-11.



Fonte: Própria

A simulação realizada considerando o Cenário 1 (Figura 26) mostra que a pressão no nó N691 atinge a faixa de 44 m.c.a no período da madrugada (2 h às 4 h), quando há a menor demanda requerida. Porém, no momento de maior demanda diária (11 h), a pressão encontra-se abaixo dos 6 m.c.a, evidenciando uma situação inferior a mínima estabelecida pela ABNT 12218 (10 m.c.a). Esse resultado evidencia o amplo intervalo de variação de pressão, que além de causar danos as tubulações, representam um consumo de energia desnecessário, na medida em que há o fornecimento de pressão além do mínimo normativo.

Figura 26 – Pressão ao longo do dia no Nó N691 – Cenário 1

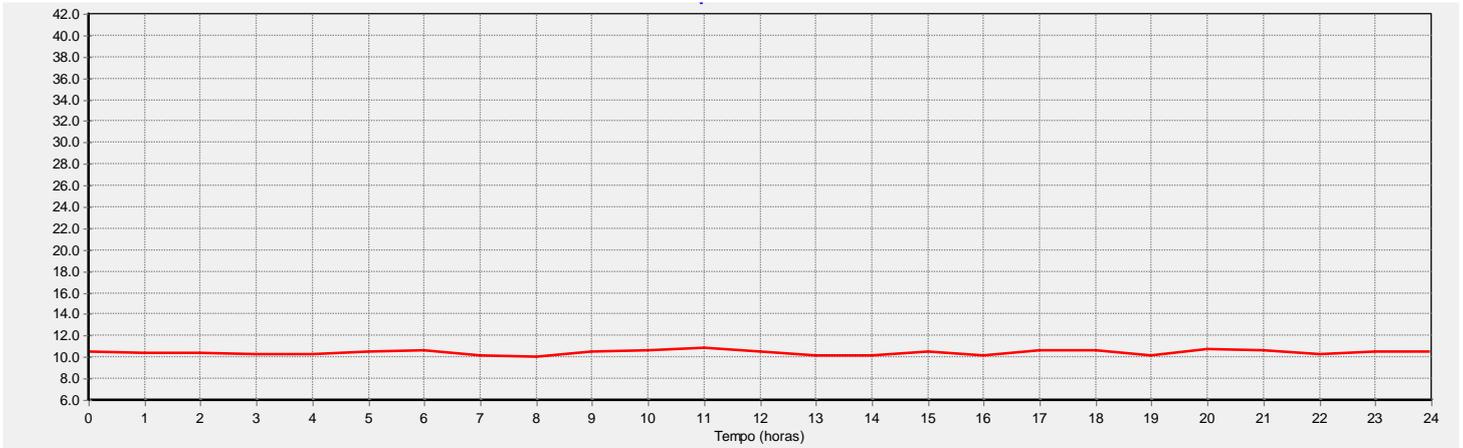


Fonte: Própria

O resultado obtido através da simulação do Cenário 2 (Figura 27) mostra que, com a implementação do inversor de frequência, foi possível controlar a pressão em N691 na faixa dos 10 m.c.a em função da demanda requerida e, como consequência, os valores de pressão nos demais pontos do setor foram reduzidos, representando um sistema mais estável (redução no

número de danos estruturais nas tubulações) e com um menor consumo de energia elétrica. O gráfico da Figura 27 foi reproduzida com a mesma escala do gráfico da Figura 26 para melhor visualização do ganho hidroenergético obtido.

Figura 27 – Pressão ao longo do dia no Nó N691 – Cenário 2



Fonte: Própria

No que se refere ao consumo energético, o Cenário 1 se mostrou mais ineficiente, pois de acordo com os dados obtidos, o gasto foi de 0,16 kWh/m³ de água bombeada sendo superior ao Cenário 2, que apresentou um consumo de 0,10 kWh/m³, em 60%. Com relação ao custo da energia elétrica consumida, o bombeamento utilizado no Cenário 1 manifestou valor monetário superior ao simulado no Cenário 2 em 43,87%, representando uma diferença mensal de R\$ 5.115,30. Os resultados podem ser observados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Comparação os parâmetros e custos referentes ao bombeamento nos cenários simulados.

| Cenário | Porcentagem Utilizada | Rendimento Médio | kWh/m ³ | kW Médio | kW Máximo | Custo/dia (R\$) | Custo/ mês (R\$) |
|---------|-----------------------|------------------|--------------------|----------|-----------|-----------------|------------------|
| 1 | 100 | 75 | 0,16 | 62,26 | 82,03 | 559,21 | 16.776,30 |
| 2 | 100 | 75 | 0,10 | 43,28 | 93,28 | 388,70 | 11.661,00 |

6 CONCLUSÕES

Nos sistemas de abastecimento de água, sobretudo no Brasil, tem-se verificado altos índices no consumo de energia elétrica e na perda física de água ao longo da malha de distribuição. Desse modo, com base no exposto, pode-se concluir que o sistema de bombeamento direto com uso de inversores de frequência é um eficiente vetor no consumo de água e energia elétrica em sistemas de fornecimento de água.

Além da redução do consumo de energia elétrica e água, com o uso de bombeamento direto poupa-se gastos com implantação e a manutenção dos reservatórios de distribuição, que representa uma despesa elevada, bem como evita-se o impacto ambiental que, a depender da localização, poderá ocorrer na implantação do reservatório elevado, apoiado e semienterrado.

Apesar das possíveis vantagens proporcionadas por essa técnica de bombeamento é essencial que antes de qualquer aplicação, haja o correto dimensionamento da bomba, motor e inversor de frequência. Além disso, deverá ser desenvolvido um estudo aprofundado sobre hidráulica operacional do sistema e realizado o levantamento de custos, considerando o investimento inicial e a redução do consumo de energia ao longo do alcance do projeto, sendo possível a partir desses, atestar sobre a viabilidade técnica e econômica no projeto.

7 REFERÊNCIAS

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água: Diagnóstico, Potencial de Ganhos com sua Redução e Propostas de Medidas para o Efetivo Combate.** 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12218 - Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público.** Rio de Janeiro, 1994.

ALÉ, J. A. V. **Sistemas Fluidomecânicos – Sistemas de Bombeamento.** Rio Grande do Sul, 2010. (Apostila).

ANDRADE FILHO, L.S. Bombas e Estações Elevatórias. In: GOMES, Heber Pimentel (Org.). **Sistemas de Bombeamento: Eficiência Energética.** 2. ed. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2012. Cap. 2. p. 45-112.

ARANTO, N. **Competitor comparison: variable drives in pumping applications.** 2008. 100p. Dissertation – M. Sc. Department Head of the Department of Energy and Environmental Technology – Lappeenranta University of Technology. Lappeenranta, Finland, 2008.

ASTROM, K.J; HAGGLUND, T. **PID controllers: theory, design and tuning.** Instrument Society of America, 2ª ed. 1995. 343p.

BEZERRA, S. T. M.; CHEUNG, P. B. **Perdas de água: tecnologias de controle** – João Pessoa: Editora da UFPB, 2013. 220p.

BEZERRA, S.T.M et al. Bombas e Estações Elevatórias. In: GOMES, Heber Pimentel (Org.). **Sistemas de Bombeamento: Eficiência Energética.** 2. ed. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2012. Cap. 5. p. 203-252.

BEZERRA, S.T.M et al. Bombas e Estações Elevatórias. In: GOMES, Heber Pimentel (Org.). **Sistemas de Bombeamento: Eficiência Energética.** 2. ed. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2012. Cap. 5. p. 203-252.

BRAGHIROLI, M.A et al. **Estação Elevatória de Água de Santana: um Caso de Sucesso na Redução de Perdas e Consumo de Energia no Setor de Saneamento.** In: III International Workshop Advances In Cleaner Production, 2011, Sao Paulo: 2011. Disponível em: <http://www.advancesincleanerproduction.net/third/files/sessoes/5B/4/Braghiroli_MA - Paper - 5B4.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2017, 09h15min.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento.** Brasília, 2015.

CARVALHO, P. S. O. **“Controle para bombeamento distribuído com vistas à minimização dos custos energéticos aplicado a sistemas de abastecimento de água”.** Tese D. Sc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil, 2012.

CASSIANO FILHO, A; FREITAS, F. V. **Redução de consumo de energia elétrica com utilização de inversor de frequência**. Relatório interno - SABESP, dez. 2001.

COVAS, D.; RAMOS, H. **Minimização de Perdas de Água em Sistemas de Abastecimento**. In: Heber Pimentel Gomes; Rafael Pérez Garcia; Pedro L. Iglesias Rey. (Org.). Abastecimento de água - O estado da arte e técnicas avançadas. João Pessoa, PB: Editora Universitária UFPB, 2007. p. 9-28.

DUARTE FILHO, M. **Síntese de controlador PID para controle de pH em um reator com otimização via algoritmos genéticos**. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2014.

GOMES, H. P. (Org.) **Sistemas de Bombeamento - Eficiência Energética**. 1. ed. João Pessoa: Editora Universitária - UFPB, 2009. v. 1. 460p.

GOMES, H. P. “**Sistemas de Abastecimento de Água – Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias**”. 3a Edição. Editora Universitária, UFPB, João Pessoa, Brasil, 2009.

GOMES, H. P. “**Sistemas de Abastecimento de Água – Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias**”. 3a Edição. Editora Universitária, UFPB, João Pessoa, Brasil, 2009.

GOMES, H.P; CARVALHO, P.S.O. **Manual de sistemas de bombeamento: eficiência energética**. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2012. 189p.

HELLER, Léo. Abastecimento de água, sociedade e ambiente. In: HELLER, Léo; PÁDUA, Valter Lúcio de (Org.). **Abastecimento de Água para Consumo Humano**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. Cap. 1. p. 29-61.

MARCHI, A. **Assessing variable speed pump efficiency in water distribution systems**. In: Drinking Water Engineering and Science, Adelaide: Copernicus Publication, 2012. p. 1 - 7. Disponível em: <<http://www.drink-water-eng-sci.net/5/15/2012/dwes-5-15-2012.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2017, 19h08min.

MESQUITA, A.L.A et al. **Aspectos importantes na utilização de bombas centrífugas em velocidade variável para a redução do consumo de energia**. In: Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, VI, 2006, João Pessoa. Anais do VI Serea. João Pessoa: 2006.

MESQUITA, A.L.A et al. **Utilização de Bombas Centrífugas em Velocidade Variável para a Redução do Consumo de Energia**. In: Heber Pimentel Gomes; Rafael Pérez Garcia; Pedro L. Iglesias Rey. (Org.). Abastecimento de água - O estado da arte e técnicas avançadas. João Pessoa, PB: Editora Universitária UFPB, 2007, p. 123-140.

Programa Nacional de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental (PROCEL SANEAR). **Manual de Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética**. Rio de Janeiro: Eletrobrás/PROCEL, 2005. 65 p.

QUADROS, A.S; PINTO, A.M.A. **Controle PID com sintonia automática e adaptativa de válvulas redutoras de pressão em sistemas de abastecimento de água.** In: XI SBAI 2013, Fortaleza/CE.

SALVINO, L. R et al. **Aplicação de um controle PID na operação de sistemas de distribuição de água.** In: XIII SEREA 2014, Fortaleza/CE.

SILVA, C. A. M. da; TSUTIYA, M. T. Automação de Sistemas de Abastecimento de Água. In: TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água.** 4. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013. Cap. 13. p. 577-642.

SOUZA, R.F et al. **Bombeamento Direto nas Redes de Abastecimento através de Bombas de Velocidade Variável sem Reservatório de Distribuição.** Revista DAE, São Paulo, n. 118, p.186-195, 1969.

TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de Água: Gerenciamento de Perdas de Água e Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento:** Guia do Profissional em Treinamento: Nível 2 / Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org). Salvador: Recesa, 2008. 139p.

TSUTIYA, M.T. **Uso de Inversores de Frequência para Diminuição do Consumo de Energia em Bombeamento.** In: Heber Pimentel Gomes; Rafael Pérez Garcia; Pedro L. Iglesias Rey. (Org.). Abastecimento de água - O estado da arte e técnicas avançadas. João Pessoa, PB: Editora Universitária UFPB, 2007, p. 103-122.

YU, C.C. **Autotuning of PID controllers:** A relay feedback approach. Springer Science & Business Media, 2006.