A Eficiência Energética na Operação Ótima de Estações Elevatórias de Esgoto

The Energy Efficiency at the Optimized Operation of Elevatory Stations of Sewer

Alberto Luiz Francato*

Professor Doutor do Departamento de Recursos Hídricos - FEC/UNICAMP

Paulo Sérgio Franco Barbosa

Professor Titular do Departamento de Recursos Hídricos - FEC/UNICAMP

Edson Aparecido Abdul Nour

Professor Doutor do Departamento de Saneamento e Ambiente - FEC/UNICAMP

Endereço*: FEC/UNICAMP, Avenida Albert Einstein, 951 - Cidade Universitária "Zeferino Vaz"
Caixa Postal 6021 - CEP: 13083-852 - Campinas – SP

Data de Entrada:
06-04-2010

Data de Aprovação:
13-08-2010

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de eficiência energética para o planejamento da operação de estações elevatórias de esgoto (EEE). Verificou-se a necessidade do estudo diante da complexidade da gestão oferta e demanda dos sistemas de esgoto, uma vez que a vazão de efluentes gerada, ao longo do dia, é variável conforme curva apresentada no trabalho e também o custo por Kwh de energia elétrica não é constante durante as 24 horas do dia. Para esta situação formulou-se um modelo de otimização através da técnica de programação linear inteira mista onde procura-se agendar o acionamento e desligamento de bombas hidráulicas com o objetivo de minimizar o custo total com energia elétrica. Para estudo de caso optou-se por modelar o sistema final elevatório de esgoto de uma cidade do interior paulista que representa um problema bastante típico e suficiente para validar a metodologia desenvolvida.

ABSTRACT

This work presents a study of energy efficiency for the planning of the operation of elevatory stations of sewer (EEE). It was verified necessity of the study a time that the outflow of sewer generated to the long one of the day is changeable in agreement curve presented in the work and also the cost for Kwh of electric energy is not constant during the 24 hours of the day. Ahead of this situation a model of optimization through the technique of linear programming was formulated entire mixing where it is looked set appointments the drive and disconnection of hydraulical bombs with the objective to minimize the total cost with electric energy. For case study it was opted to shape the elevatory final system of sewer of a city of the São Paulo interior that represents a problem sufficiently typical and enough to validate the methodology developed.

PALAVRAS-CHAVE: Estação Elevatória de Esgoto. Eficiência Energética. Otimização

KEYWORDS: Elevatory Station of Sewer. Energy Efficiency. Optimization.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de tratamento de efluentes domésticos e industriais experimentaram avanços tecnológicos consideráveis nas últimas décadas. Porém, novos desafios precisam ser assumidos como, por exemplo, as questões operacionais pertinentes a estes sistemas. Em muitos casos as condições topográficas das cidades e bairros nem sempre permitem o escoamento por gravidade dos efluentes, nos coletores, até a estação de tratamento de efluentes (ETE). Por esta razão, faz-se necessário construir estações elevatórias de efluentes (EEE), para conduzir os efluentes em condutos forçados, transpondo bacias, sendo necessário para isso vencer pontos de cotas mais elevada, e em certos trajetos voltar a escoar por gravidade. Em certos casos o bombeamento pode ser necessário a distâncias consideráveis. No caso dos emissários submarinos para lançamento de efluentes, a linha de recalque pode ter vários quilômetros.

Os custos operacionais nas estações elevatórias de efluentes (EEE) atingem cifras elevadas para os municípios. Uma tarefa importante é procurar modular a operação das estações elevatórias buscando a redução dos custos diretos e indiretos e melhorar a eficiência das estações elevatórias de efluentes, seja pela redução dos custos com a manutenção ou pela economia direta com energia elétrica.

Este trabalho tem como objetivo fazer um planejamento de uma estação elevatória de efluentes (EEE) e montar um modelo de programação linear inteira mista no Microsoft Excel para agendar o acionamento das bombas em uma estação elevatória visando reduzir o custo com energia elétrica. O estudo com horizonte de planejamento diário (24 horas) e intervalos de discretização a cada 10 minutos, levando em conta os parâmetros hidráulicos da EEE, número e potência das bombas de recalque, bem como custo da energia elétrica nos intervalos analisados.

2. A COLETA E TRANSPORTE DE ESGOTO SANITÁRIO

As canalizações coletoras de efluentes sanitários funcionam como condutos livres e devem ser projetadas respeitando limites estabelecidos nas normas técnicas, em especial as declividades, o que implica em uma diminuição contínua das cotas, ao longo de cada trecho de canalização, de montante para jusante. Tendo em vista a manutenção de velocidades de escoamento, tais que consigam garantir condições de tensão trativa maior ou igual a 1 Pa, isto faz com que cada trecho será projetado em função de uma declividade mínima.

Para que os custos com escavações e instalação das canalizações sejam viáveis é recomendado procurar a concordância entre o sentido do escoamento nos condutos e a declividade natural do terreno, respeitando a declividade mínima exigida para cada trecho projetado (MACINTYRE, 1997).

Porém, nem sempre se tem condições topográficas onde a superfície do terreno apresente tais situações e, assim,

para que se tenham condições mínimas de escoamento, a profundidade dos condutos cresce de montante para jusante, podendo atingir níveis impraticáveis, caso o perfil topográfico do projeto ao longo do desenvolvimento da canalização continue em condições desfavoráveis. Se os condutos atingirem profundidades excessivas, teoricamente acima de 4,0m (dificuldades para operação de retro-escavadeira), então, devem ser empregadas instalações que transportem as vazões até então recolhidas, para uma cota que permita a construção e operação dos trechos a jusante daquele ponto novamente em condições viáveis tecnicamente (trechos em condutos forçados). Esta recuperação de cotas é obtida por meio de uma estação elevatória de efluentes. Além da situação descrita é possível projetar elevatórias específicas para recalque de efluentes produzidos em áreas baixas, para captação de vazões de bacias diferentes (sistemas distritais), quando da ultrapassagem de divisores de água, na necessidade de lançamentos submersos nos recalques de lodos nas estações de tratamento. Uma estação elevatória, por ser uma instalação eletromecânica que consome energia, acondicionada em edifício próprio, constitui-se em uma obra que irá onerar tanto a implantação, quanto a operação do sistema, devendo ser objeto de minuciosos estudos comparativos, para que seu projeto só seja definido quando não houver opção técnica alternativa mais viável.

2.1. Estações Elevatórias de Esgoto

Segundo AZEVEDO NETO (1998) as estações elevatórias de efluentes (EEE) podem ser classificadas de várias maneiras, porém nenhuma delas é satisfatória. O autor menciona que a classificação pode ser feita em função da capacidade, da altura de recalque, da extensão do conduto, da fonte de energia, do tipo de construção e outras. A PNB-569/75 da ABNT classifica as estações elevatórias de efluentes de acordo com os seguintes critérios:

Tabela 01 – Classificação de uma Estação Elevatória de Efluentes

Classificação de uma EEE		
Quanto à Vazão	$Q_r \leq 50 \text{ Ls}^{-1}$	Pequena
	$50 < Q_r \leq 500 \text{ Ls}^{-1}$	Média
	$Q_r > 500 \text{ Ls}^{-1}$	Grande
Quanto ao Desnível Geométrico	$H \leq 10 \text{ mca}$	Baixa
	$10 < H \leq 20 \text{ mca}$	Média
	$H > 20 \text{ mca}$	Alta
Quanto ao Comprimento	$L \leq 10 \text{ m}$	Curta
	$L > 10 \text{ m}$	Longa

As EEE têm suas características definidas a partir da determinação das vazões a elevar, dos equipamentos a serem instalados e do método construtivo.

Tipicamente quando são moldadas no local, as EEE são estruturas construídas em concreto armado nas construções subterrâneas e em alvenaria nas externas.

Constituem-se de uma câmara de recepção denominada de poço úmido, de detenção ou de coleta, no qual se instalam grades de retenção de material grosseiro ($d > 2,5 \text{ cm}$)

e dispositivos para retirada desse material retido, escadas fixas de acesso, entradas de sucção e extravasores. Também possuem uma câmara de operação denominada de poço seco ou câmara de trabalho, onde estão instalados os equipamentos de impulsão (conjuntos moto-bombas), geradores, válvulas de controle e antigolpe, conexões de continuidade do recalque, exaustores, além de estruturas de circulação de operadores e transporte de máquinas. (MACINTYRE, 1997). Nas EEEs de maior porte, sobre o poço seco, podem estar localizadas dependências de acomodação dos operadores (instalações sanitárias e escritório) e equipamentos e dispositivos necessários a operação e manutenção das instalações (talhas, ganchos e chaves, quadros elétricos, alarmes e painéis de controle automáticos e manuais), sistemas de ventilação e calefação, drenagem, etc.

Para escolha definitiva da localização de uma EEE devem ser observados e analisados os seguintes aspectos:

- ✓ menor desnível geométrico entre a captação e o fim do recalque e menor extensão deste;
- ✓ facilidade de obtenção do terreno para instalação da EEE;
- ✓ proteção natural contra possíveis inundações;
- ✓ possibilidades de ampliações futuras;
- ✓ facilidades de acesso;
- ✓ possibilidades de eventuais descargas de esgotos em galerias ou canais próximos quando de paralisações do sistema elevatório;
- ✓ distância das maiores concentrações habitacionais;
- ✓ facilidade de obtenção de energia elétrica;
- ✓ redução de ruídos (uso de painéis acústicos);
- ✓ controle de odores (limpeza periódica do poço úmido e grades);
- ✓ harmonização da edificação com o ambiente vizinho.

Independente dos pontos citados, as recomendações para o posicionamento das E.E.E., em geral, decorrem do traçado das redes coletoras e canalizações de maior diâmetro equivalente, situando-se nos pontos mais baixos de uma bacia, ou de um setor de coleta, ou nas proximidades de rios, córregos e praias.

No entanto, as questões sobre eficiência energética e otimização do custo operativo deveriam ser incorporadas ao conjunto de fatores citados, pois elas representam uma parcela significativa do orçamento anual das empresas de saneamento.

2.2. Equipamentos para recalque de efluentes

Nas estações elevatórias de esgotos o tipo de bomba mais utilizado é a centrífuga, com velocidade fixa ou variável, podendo ser de eixo horizontal ou vertical. As verticais podem ser com motor acoplado ou de eixo longo, estas de uso menos frequente. Também são muito empregados os conjuntos moto-bombas submersíveis (de eixo vertical). Além das bombas centrífugas também são empregadas as bombas helicoidais e os ejetores pneumáticos, com relativa frequência. A descrição das principais características e a aplicabilidade desses equipamentos é o que será desenvolvido a seguir.

As bombas centrífugas são compostas de uma carcaça que molda em seu interior um canal de secção gradualmente crescente para direcionar o líquido bombeado para a saída da bomba com energia de pressão. Este canal é chamado de voluta. Dentro da voluta encontra-se um elemento girante denominado de rotor que recebe energia mecânica através do seu eixo e, pelo princípio da força centrífuga, remete o líquido aspirado através

da sucção, do seu centro para a periferia, na voluta.

Diferentemente dos rotores empregados no bombeamento da água limpa, que são do tipo fechado, os de bombas centrífugas para esgotos são do tipo aberto, que permitem o bombeamento de sólidos em suspensão no esgoto, com diâmetros equivalentes iguais a até cinco centímetros. Também é freqüente o emprego de conjuntos moto-bombas submersíveis. Esses conjuntos têm a vantagem imediata, do ponto de vista construtivo, de não requererem a construção de um poço seco. Nestes conjuntos a bomba e o motor formam um monobloco que opera dentro da massa líquida a ser elevada. O conjunto pode ser movimentado verticalmente através de uma haste-guia (ou conjunto de hastes) em aço inoxidável que permite o acoplamento automático entre o flange de saída da bomba e o da entrada da tubulação de recalque, apenas pelo seu peso próprio, sem necessidade de parafusos, tornando igualmente singela as operações inversas com emprego de uma talha quando de previsíveis inspeções ou reparos.

3. TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

As técnicas de otimização vem sendo aplicadas com sucesso nas últimas décadas para a solução de problemas de alocação de recursos, sistemas de logística e transportes, planejamento de produção, etc. Sua história de desenvolvimento vem desde a Segunda Guerra Mundial, onde a United States Air Force organizou um grupo de pesquisadores de nome SCOOP (Scientific Computation of Optimum Program), sob a direção de Marshall K. Wood, para tentar solucionar o problema de alocação de recursos limitados de modo a otimizar objetivos. George B. Dantzig era um dos membros deste grupo, e embora nenhum método de expressivo sucesso fosse descoberto durante a guerra, ele formulou o problema de programação linear geral e propôs o Método Simplex em 1947. Foram desenvolvidos alguns métodos práticos de solução para o problema de programação linear baseado no Método Simplex entre 1948 e 1952. Durante estes anos, algumas atenções foram dirigidas para uso dos primitivos equipamentos computacionais, limitados em alcance e velocidade de processamento.

Em 1957 outros aperfeiçoamentos ocorreram: o aperfeiçoamento das técnicas de inversão de matrizes, a manobra de variáveis implicitamente limitadas e a introdução do algoritmo dual, cuja teoria já havia sido lançada em 1953. Nenhum destes desenvolvimentos foi de grande uso durante muitos anos, entretanto eles são agora características padrões, em versões melhoradas, de sistemas de programas computacionais para Programação Linear (PL).

Desde 1957 todos os aspectos da PL foram desenvolvidos em ritmo e escopo acentuados. Técnicas de decomposição foram estudadas desde 1953, porém tais técnicas eram na época impraticáveis ou ineficientes. Porém, com a publicação, em 1959, do algoritmo Dantzig-Wolfe, o interesse por estas técnicas cresceu muito. Por volta de 1963, os desenvolvimentos se voltaram para os programas computacionais e considerações sistêmicas, especialmente as técnicas algébricas. Grandes passos também foram dados para descobrir novas aplicações para a programação linear.

A qualidade de um modelo de Programação Linear está associada à exatidão com que ele representa a realidade e o grau em que captura aspectos essenciais da realidade. Contudo, é comum que nem todos os aspectos intervenientes possam ser controlados. É importante saber selecionar o que é relevante. Estes cuidados necessários na modelagem de

problemas justificam a formação de equipe de profissionais de diferentes áreas, num esforço de sinergia para a modelagem de problemas complexos que envolvem conhecimento de natureza multidisciplinar.

3.1. Solução Computacional

Para a solução de problemas de otimização é recomendado o uso de softwares adequados para o tipo do problema a ser resolvido. Dentre os vários aplicativos disponíveis para microcomputadores, um deles se destaca pela facilidade do ambiente tipo planilha eletrônica, que é o Solver da planilha eletrônica EXCEL. Esta planilha acompanha o OFFICE que é um produto da Microsoft Corporation e pode ser processado no sistema operacional Windows. O Microsoft Excel Solver resolve problemas genéricos de programação matemática, podendo usar o código de otimização não-linear Generalized Reduced Gradient. Já para os problemas lineares com variáveis inteiras utiliza-se o Método Simplex com limites sobre as variáveis e o método de desvio e limite (LOESCH, 1999). Devido à popularidade da planilha Excel e, por consequência a maior possibilidade de acesso a ferramenta Solver, foi então escolhida para ilustrar como um problema de PL pode ser computacionalmente resolvido.

3.2. A Programação Inteira e mista

Os problemas de Programação Linear Inteira e Mista são, a princípio, estruturados da mesma forma que os de Programação Linear. O que os caracteriza é a presença de ao menos uma restrição de integridade. De acordo com LOESCH (1999), “entende-se por restrição de integridade imposta a uma variável, a exigência feita quanto os possíveis valores que podem ser assumidos pela mesma, devendo assumir um número inteiro.”

É o caso de uma variável que representa, por exemplo, a quantidade de carros produzidos. Ao impor restrições de integridade para estas variáveis temos um problema de Programação Inteira / Mista. Se todas as variáveis dever ser inteiras, costuma-se denominar o problema de programação inteira; caso as restrições de integridade sejam impostas apenas a algumas variáveis do modelo, mas não todas, temos um problema de programação mista. Não obstante, a técnica de resolução empregada é a mesma.

Um procedimento algorítmico mais bem elaborado é imprescindível. Uma alternativa é a Técnica de Ramificação e Limite (Branch and Bound). Embora existam outros algoritmos de programação inteira, como o de Balas e de Gomory, algoritmos de enumeração lexicográfica, etc; o algoritmo da Ramificação e Limite é o de emprego mais comum. Em termos de eficiência computacional, na comparação entre os diversos algoritmos, não existe uma palavra final. Isto é, enquanto o algoritmo de Ramificação e Limite é mais eficiente que os demais para determinados problemas, pode suceder o contrário em outros.

4. METODOLOGIA

O problema da operação de uma ETE, além de atender requisitos ligados diretamente ao tipo de fluido, o qual não pode permanecer muito tempo no reservatório de sucção, ainda merece

estudos sobre eficiência energética advinda do planejamento do sistema de bombeamento.

A entrada de efluentes numa EEE não é constante ao longo do dia e percebe-se claramente que a variação na vazão de entrada de efluentes é dependente da vazão de saída de água tratada nas estações de tratamento de água (ETA). A maior parte dos reservatórios domésticos permanecem cheios a menos que ocorra interrupções no fornecimento de água tratada. Portanto, à medida que se consome água, necessita-se de água para repor ao reservatório e gera-se esgoto para a rede coletora, mesmo que com uma porcentagem de perdas em função do tipo de uso da água.

Atendendo às orientações de número máximo de partida nos motores a cada intervalo de tempo, respeitando tempo máximo de permanência do efluente no reservatório de sucção, pode-se equacionar um mecanismo otimizado de acionamento das bombas hidráulicas de maneira a minimizar os custos total ao longo de um determinado período com energia elétrica. Salienta-se que não se trata de minimizar o consumo total de energia elétrica ao longo do período e sim o custo total, pois é necessário levar em conta o fato que o valor da tarifa é diferenciado ao longo das 24 horas do dia como forma de penalizar o consumo próximo aos horários de pico.

4.1. Equacionamento do Problema de Otimização

A seguir descrevem-se as equações matemáticas que definem o problema de bombeamento de efluentes em uma EEE.

4.1.1. Vazão média horária afluente a EEE

A vazão horária média de entrada de efluentes na EEE pode ser obtida pela divisão do volume diário total de esgoto bombeado à ETE pelo número de horas de um dia (24h).

$$\bar{Q}_E = \frac{V_{ED}}{24} \quad (1)$$

onde:

$\bar{Q}_E$: Vazão média horária de efluente bombeado (m³/h);

V_{ED} : Volume de esgoto diário bombeado (m³).

Para o planejamento da estratégia otimizada de operação das bombas hidráulicas é necessário conhecer as magnitudes das vazões de entrada de efluentes na EEE a cada hora. Para isso uma boa aproximação é a utilização de uma curva neutra de demanda de água tratada na ETA e assim aplicar coeficientes multiplicadores da vazão horária média, de forma a construir uma sequência de 24 valores distintos de vazão de entrada na EEE. A denominação “curva neutra” significa tomar em cada hora a vazão da hora dividida pela vazão média diária, caracterizando um fator adimensional (K_t) específico para cada hora.

$$Q_{E,t} = K_t \times \bar{Q}_E \quad (2)$$

onde:

$Q_{E,t}$: Vazão de efluente no intervalo t (m³/h);

K_t : Coeficiente da curva neutra para o intervalo t;

$\bar{Q}_E$: Vazão média diária de entrada de efluentes a EEE (m³/h);

4.1.3. Balanço hídrico no reservatório de sucção da EEE

O balanço hídrico na EEE deve ser mantido em todos os intervalos e a diferença entre as vazões de entrada e saída na EEE, multiplicado pelo intervalo de tempo t deve ser numericamente igual a variação de nível no reservatório de sucção multiplicado pela área da base do reservatório de sucção. Observa-se que as bombas utilizadas na EEE são iguais.

$$Q_{E,t} - Q_{B,t} \times N_{B,t} = (N_{F,t} - N_{I,t}) \times \left(\frac{A}{t}\right) \quad (3)$$

onde:

$Q_{B,t}$: Vazão do ponto de funcionamento de uma bomba hidráulica no intervalo t da EEE (m³/h);

$N_{B,t}$: Número de bombas em operação no intervalo t (unid.);

$N_{F,t}$: Nível d'água (efluentes) no reservatório de sucção ao final do intervalo t (m);

$N_{I,t}$: Nível d'água (efluentes) no reservatório de sucção no início do intervalo t (m);

A : Área da seção transversal do poço de sucção (m²);

4.1.4. Nível máximo e mínimo operacional do reservatório de sucção

É preciso atender a algumas restrições operacionais e dentre elas destacam-se a manutenção de níveis máximos e mínimos no reservatório de sucção.

$$N_{MÍN} \leq N_{I,t} \leq N_{MÁX} \quad (4)$$

$$N_{MÍN} \leq N_{F,t} \leq N_{MÁX} \quad (5)$$

onde:

$N_{MÍN}$: Nível mínimo operacional no reservatório de sucção;

$N_{MÁX}$: Nível máximo operacional no reservatório de sucção;

4.1.5. Número de bombas hidráulicas em operação na EEE

O número de bombas hidráulicas em operação não pode exceder o número total de bombas disponíveis, já o número mínimo de bombas hidráulicas em operação pode ser zero caso seja permitido a parada total da EEE ou fixar um número mínimo de bombas em operação desde que a vazão de entrada de efluentes tenha condição de manter o sistema em funcionamento.

$$N_{B,MÍN} \leq N_{B,t} \leq N_{B,MÁX} \quad (6)$$

onde:

$N_{B,t}$: Número de bombas em operação no intervalo t;

$N_{B,MÍN}$: Número mínimo de bombas em funcionamento;

$N_{B,MÁX}$: Número máximo de bombas em funcionamento.

4.1.6. Potência e Energia

A potência exigida nos conjuntos moto-bomba está diretamente relacionada ao rendimento dos conjuntos, à altura manométrica para efetuar o bombeamento e a vazão. O peso específico do fluido pode ser considerado bem próximo ao valor utilizado para a água. Como forma de simplificar o equacionamento foi admitido que a altura manométrica fique em torno de um valor médio diário. Esta simplificação é bastante razoável uma vez as cotas acima ou abaixo deste nível médio se compensam ao longo do dia. Assim, foi estabelecida uma constante de cálculo que multiplicada pela vazão de bombeamento de efluente resulta na potência necessária. Esta potência multiplicada pelo número de conjuntos moto-bomba e pelo tempo resulta no valor da energia necessária para tal operação.

$$P_t = 2,28 \times 10^{-4} \times \eta \times H_t \times Q_B \quad (7)$$

$$H_t = \bar{H} \quad (8)$$

$$K_{B,t} = 2,28 \times 10^{-4} \times \eta \times \bar{H} \quad (9)$$

$$P_t = K_{B,t} \times Q_B \quad (10)$$

$$E_t = P_t \times N_{B,t} \times t \quad (11)$$

onde:

P_t : potência requerida para o intervalo t (KW);

η : rendimento do conjunto moto-bomba (%);

H_t : carga manométrica no intervalo t (m);

$\bar{H}$: carga manométrica média ao longo do horizonte diário (m);

$K_{B,t}$: constante da expressão da potência (KW/m³/h);

E_t : Energia requerida no intervalo t (KWh).

4.1.7. Custo do Bombeamento de efluentes

O custo com energia a cada intervalo de tempo é obtido multiplicando-se o valor da energia pelo custo da energia no intervalo de tempo correspondente. Nesta metodologia admite-se a possibilidade de trabalhar com custos diferenciados a cada intervalo de tempo e assim o modelo priorizar bombeamentos em momentos que o valor da energia seja de menor custo.

$$C_{E,t} = P_{E,t} \times E_t \quad (12)$$

onde:

$C_{E,t}$: Custo com energia elétrica no intervalo t (R\$);

$P_{E,t}$: Preço da energia elétrica no intervalo t (R\$/KWh);

4.1.8. Objetivo: Minimização do Consumo de Energia Elétrica

O objetivo desta metodologia é promover o bombeamento necessário na EEE, de forma a minimizar o custo

com o fornecimento de energia, o que também garante a eficiência energética caso as tarifas horárias não sejam diferenciadas. A função objetivo do problema de otimização foi definida por:

$$CE = \sum_{t=1}^{24} C_{E,t} \quad (13)$$

onde:

CE : rendimento do conjunto moto-bomba (%);

5. ESTUDO DE CASO

Para demonstrar a viabilidade da metodologia desenvolvida neste trabalho optou-se por realizar um estudo de caso aplicado na modelagem da Estação Elevatória de Efluentes (EEE) que serve a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma cidade de médio porte do interior do Estado de São Paulo. Trata-se, portanto, de um Estação Elevatória de Efluentes existente, configurada como convencional de poço úmido com conjunto de moto-bomba submerso. Todo efluente se concentra num poço de visita à montante da EEE. Em seguida, o efluente atravessa por uma caixa de areia, para que ocorra a sedimentação das partículas mais finas. Finalmente, o efluente chega ao reservatório de sucção, onde se encontram os conjuntos moto-bomba. A tubulação de recalque é toda em ferro fundido, com registros e válvulas de retenção na saída da EEE. O efluente é recalcado até as lagoas de aeração e decantação, localizada numa cota adequada, que permite o seu encaminhamento por gravidade até ser despejado (após tratamento) em um curso d'água com capacidade de suporte.

Uma dificuldade que pode ser destacada na estrutura física da EEE é a falta da divisão da estação em duas células distintas, que permitiria a operação alternada em um período pré-fixado em cada célula, permitindo a realização das manutenções preventivas na célula que se encontra parada.

O funcionamento do conjunto moto-bomba submersível é feito por meio de bóias automáticas (chave de nível inferior e chave de nível superior), porém o funcionamento destas bóias não é muito eficiente, principalmente por causa da aderência de materiais flutuantes constantemente encontrados nas estações elevatórias de esgoto. No quadro 1, apresentado a seguir, pode-se verificar as características técnicas da EEE.

Quadro 1 – Dados da Estação Elevatória de Esgoto em Estudo

Variável	Valor	Unidade
Volume total de esgoto aduzido por dia	70.000	m ³ /dia
Nível mínimo operacional da caixa de sucção	1,00	m
Nível máximo operacional da caixa de sucção	9,00	m
Área da base da caixa de sucção	98,00	m ²
Vazão no ponto de funcionamento da bomba	0,650	m ³ /s
Diâmetro da tubulação de recalque	600	mm
Bomba KSB – KRT K 350 - 500	05	unid.

Na figura 1 apresenta-se a curva de efluentes que chegam a EEE para uma região com predominância residencial que tem como principal período de geração de efluentes a parte diurna. Refere-se ao gráfico em estudo das áreas totalmente edificadas, porém, com número de moradores distinto. Para o gráfico apresentado na figura 1, o número de moradores é maior ou igual a 4,5 moradores por economia.

Figura 1 – Curva de afluência de efluentes na EEE

Na figura 2 apresenta-se o esquema de acionamento das bombas hidráulicas ao longo do horizonte de planejamento, obtido pela utilização do modelo de otimização. Com a aplicação da metodologia de otimização verificou-se que foram necessárias no máximo três bombas em uso concomitante, e isso em apenas um intervalo de dez minutos. Nos intervalos de baixa demanda a necessidade ficou limitada a uma bomba em operação.

A figura 3 apresenta a porcentagem de armazenamento no reservatório de sucção para o horizonte de planejamento. É interessante notar que a solução ótima utiliza duas bombas apenas, em horário fora da ponta, levando o reservatório de sucção, às dezenove horas, em posição bastante baixa (20%), assim permitindo trabalhar com uma bomba durante o período de ponta e acumular efluentes no reservatório até cerca de 85% (após as vinte horas). É importante observar que a solução ótima garante a viabilidade de implementação operacional, pois todas as restrições operacionais foram formuladas adequadamente por meio das equações (1) a (6). É claro que a solução ótima pode ainda ser simplificada para facilitar a implementação, definindo por exemplo (neste caso), a utilização de apenas uma bomba entre 00:00h e 07:00hs, duas bombas entre 07:00hs e 19:00hs e uma bomba entre 19:00hs e 24:00hs. A necessidade pontual (10 minutos) de três bombas entre 11:00hs e 12:00hs seria eliminada, pois em bloco de período anterior (00:00h às 07:00hs) já foi utilizada continuamente uma bomba (permanentemente ligada).

A potencialidade da utilização da metodologia seria significativamente ampliada caso fossem consideradas mais de uma EEE da cidade, permitindo ganhos adicionais, decorrentes da gestão integrada das vazões de efluentes na rede coletora e no conjunto de EEE existente.

Figura 2 – Número de bombas em operação

Figura 3 – Porcentagem de volume do reservatório de sucção ocupado com efluente

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo estudar o planejamento da operação de estações elevatórias de esgoto (EEE). Como estudo de caso analisou-se a EEE principal do município de Jundiaí no Estado de São Paulo. De acordo com os dados levantados e os resultados operacionais advindos da modelagem de otimização aplicada, pode-se verificar que a estação elevatória tem capacidade superior à necessária atualmente. Este fato pode ser observado na figura 2, pois em nenhum momento do horizonte de planejamento analisado as cinco bombas presentes na estação elevatória de efluentes entraram em operação conjunta. Sendo assim, pode-se supor que a estação elevatória de esgoto esteja preparada para incrementos clandestinos de vazão de águas pluviais ligadas indevidamente nas redes coletoras de esgoto.

Um dos objetivos deste trabalho foi a redução dos custos de energia elétrica para operação da estação elevatória de esgoto. Conforme pode ser observado na figura 3, nos horários de ponta foi possível usar o reservatório para acumular o esgoto e trabalhar com um número mínimo de bombas (apenas uma).

Com os resultados obtidos verificou-se que há possibilidade de ganhos com economia no consumo de energia elétrica na fase operacional. Caso o volume do reservatório de sucção fosse estudado com um modelo de otimização na fase de projeto, isto traria flexibilidade à implementação de políticas operacionais otimizadas.

O trabalho de pesquisa evidenciou a potencialidade de aplicação de otimização a sistemas e estações elevatórias de esgoto, permitindo a representação detalhada das equações e condicionantes operacionais, contribuindo para a promoção de redução de custos e da eficiência energética no setor de saneamento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO NETTO, J. M. Manual de Hidráulica. Editora Edgard Blucher Ltda. 8 ed., 1998.
- CRESPO, P. G. Elevatórias nos Sistemas de Esgotos. Editora UFMG, 2001.
- LOESCHE, C. Pesquisa Operacional: Fundamentos e modelos. Editora da FURB, 1999.
- MACINTYRE, Archibald Joseph. Bombas e Instalações de Bombeamento. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S/A. 2 ed., 1997.
- NBR 12.208 – Projeto de Estações Elevatórias de Esgoto Sanitário. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Abril/1992