

# PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ESGOTO UTILIZANDO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE ITAÍ/SP

## **Diogo Hiroshi Nitatori**<sup>(1)</sup>

Engenheiro Civil, Pós-Graduação em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual de Campinas. Engenheiro da Sabesp da Unidade de Negócio do AltoParanapanema.

## **Paulo Vatavuk**

Engenheiro Mecânico, Pós-Doutorado pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço, Doutor e Mestre pela Universidade São Paulo. Professor Titular do Departamento de Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

## **Alberto Luiz Francato**

Engenheiro Civil, Livre Docente, Doutor e Mestre pela Universidade Estadual de Campinas. Professor Titular do Departamento de Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Avenida Padre Antônio Brunetti, 1234 – CEP 18208-080 – Itapetininga/SP, Brasil – E-mail: dhnitatori@sabesp.com.br

## **RESUMO**

Apresenta-se uma proposta para a adequação de uma estação elevatória de esgoto (EEE) existente, com capacidade saturada, levando em consideração a eficiência energética e operacional. Verificou-se a necessidade de tal estudo já que a vazão afluente à EEE, ao longo do dia, é variável assim como o custo com energia elétrica (KWh) ao longo das 24 horas do dia. Este trabalho utiliza um modelo de otimização composto de programação não-linear, inteira e mista para agendar o acionamento e o desligamento do conjunto moto-bomba com o objetivo de minimizar o custo total com a energia elétrica, e assim buscar a operação eficiente do sistema. O estudo de caso foi realizado em uma EEE no município de Itaí, no estado de São Paulo, e como resultado obteve uma redução no custo total de energia elétrica. A transformação do poço pulmão em poço de sucção foi o principal fator para alcançar esta economia.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estação elevatória de esgoto, pesquisa operacional, programação não-linear.

## **INTRODUÇÃO:**

Em diversas situações topográficas das cidades ou dos bairros não se permite o escoamento dos efluentes por gravidade, dos coletores, até a estação de tratamento de esgoto (ETE). Assim, faz-se necessário construir estações elevatórias de esgoto (EEE) para conduzir os efluentes em regimes de conduto forçado, e assim transpor bacias e vencer pontos com cotas mais elevada. Atualmente, com a necessidade de expansão das redes de esgoto com o objetivo de universalização do sistema e atendimento das legislações ambientais vigentes, as companhias de saneamento necessitam implantar EEEs para atender tais demandas.

Os conjuntos moto bombas presentes nas EEEs necessitam de energia elétrica para a operação. Nos últimos tempos, diversas companhias de energia tiveram que diminuir a produção de energia gerada através das usinas hidrelétricas (maior fonte de geração de energia no Brasil), o que gerou a necessidade de acionar as usinas termelétricas. Como consequência desta alteração houve o aumento do preço da energia elétrica para os consumidores.

Os custos operacionais com as EEEs possuem valores significativos para as companhias de saneamento. Assim a busca do planejamento da operação das estações elevatórias com o intuito de redução dos custos diretos e indiretos e melhorar a eficiência das EEE são essenciais para o desenvolvimento sustentável e a

eficiência energética. Portanto a otimização da operação das EEEs pode implicar em redução dos custos com a manutenção ou a economia direta com energia elétrica.

## **OBJETIVO:**

Este trabalho tem como objetivo a realização do planejamento de uma estação elevatória de esgoto (EEE) e com isso elaborar um modelo de programação não linear, inteira e mista no Microsoft Excel para agendar o acionamento da bomba em uma estação elevatória com o objetivo de redução do custo com energia elétrica. O estudo possui horizonte de planejamento diário (24 horas) e um intervalo de discretização a cada 5 minutos. Foram considerados os parâmetros hidráulicos para a operação da EEE conforme normas e legislações vigentes, bem como custo da energia elétrica nos intervalos analisados.

## **COMPONENTES DAS ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ESGOTO:**

As EEEs são essenciais para promover a universalização da coleta de esgoto sanitário e encaminha-los para a estação de tratamento de esgoto (ETE). As EEEs contribuem para o desenvolvimento sustentável já que na maioria das aplicações promovem a remoção de lançamentos de esgoto “in natura” nos recursos hídricos.

As principais classificações das EEEs ocorrem em função da sua capacidade, altura manométrica, extensão da linha de recalque, tipo de fonte de energia, método construtivo entre outras.

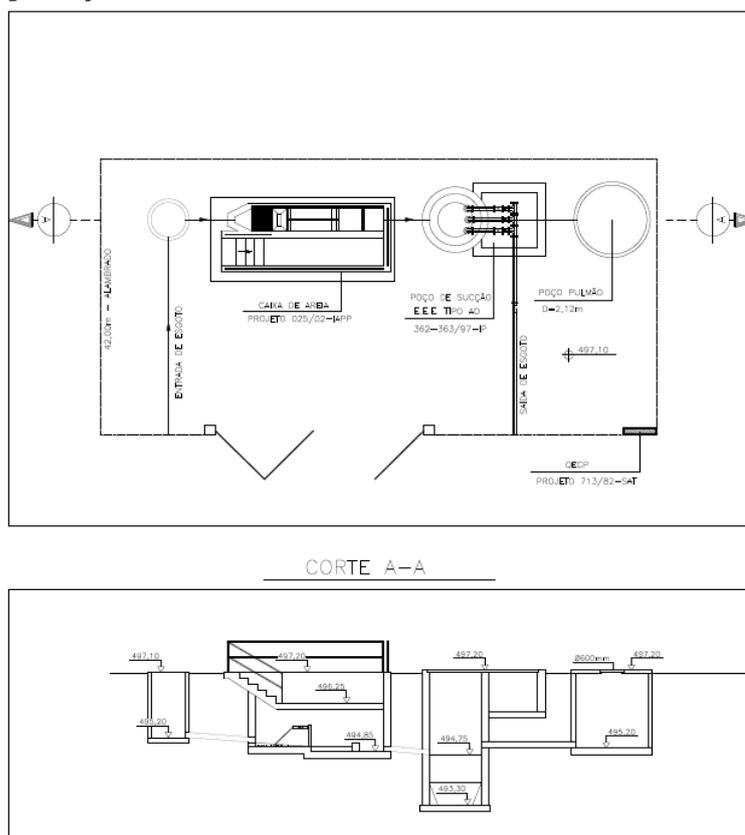
Nas estações elevatórias de esgoto o tipo de bomba mais utilizado é a centrífuga, com velocidade fixa ou variável, podendo-se aplicar também as bombas helicoidais e os ejetores pneumáticos. Segundo Azevedo Netto (1998) as estações elevatórias de esgoto devem ser concebidas prevendo no mínimo duas bombas, sendo uma reserva e com alternância de trabalho com as demais unidades instaladas.

Conforme Tsutiya e Alem Sobrinho (1999) as estações elevatórias necessitam de dispositivos complementares para a operação eficaz das bombas, que são:

- Gradeamento;
- Caixa de areia (desaneradores);
- Poço de sucção, e
- Extravazão por gravidade/ gerador de emergência.

A figura 1 a seguir apresenta o esquema de implantação de uma EEE com os dispositivos complementares citados anteriormente, segundo Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, SABESP (2012). No caso da figura 1, o esgoto entra no sistema de gradeamento para a remoção de sólidos grosseiros, em seguida ocorre a passagem para os desaneradores onde se remove a areia através da sedimentação. Por fim, o esgoto sem rejeitos se acumula no poço de sucção para o posterior recalque. O poço pulmão tem a finalidade de evitar extravasamentos, em situações em que houver problema operacional nos conjuntos moto bombas localizados no poço de sucção.

**Figura 1: Projeto de implantação de EEE.**



É possível observar que os dispositivos complementares que são essenciais para a operação adequada das bombas na EEE já que permitem a sua operação sem desgastes ou entupimentos. A seguir, serão descritos a finalidade de cada dispositivos complementares citados anteriormente.

O primeiro dispositivo para a proteção do conjunto elevatório é o sistema de gradeamento que possui a finalidade de remoção de sólidos grosseiros. A NBR12.208/1992 (ABNT, 1992) admite os seguintes tipos de proteções contra sólidos:

- Grade de barras, de limpeza manual ou mecânica;
- Cesto;
- Triturador;
- Peneira.

Tsutiya e Alem Sobrinho (1999) complementam que a trituração de sólidos grosseiros não é usual no sistema de esgotamento sanitária brasileira.

A mesma NBR12.208/1992 (ABNT, 1992) subdivide as grades de barras conforme o espaçamento entre as barras da seguinte maneira:

- Grade grossa: 40 mm a 100 mm;
- Grade média: 20 mm a 40 mm;
- Grade fina: 10 mma 20 mm.

A instalação de gradeamento fica condicionada em relação ao porte da EEE. Para EEEs de pequeno porte utilizam-se, de forma geral, cestas removíveis por içamento e a instalação da mesma à altura da boca de descarga do coletor. Já para EEEs de médio porte e/ou mais profundas utiliza-se, normalmente, grades com limpeza mecanizada. Por fim, em EEEs de grande porte costuma-se complementar o sistema anterior com a instalação de grade grosseira a montante do equipamento mecanizado. (TSUTIYA e ALEM SOBRINHO, 1999).

A NBR12.208/1992 (ABNT, 1992) recomenda a utilização de grade mecanizada para vazões superiores a 250l/s.

O segundo dispositivo, os desarenadores possuem a função de remoção da areia contida nos esgotos. O mecanismo de remoção da areia ocorre por sedimentação, ou seja, os grãos de areia devido às suas dimensões e densidades vão para o fundo do sistema. Estes dispositivos podem ser retangulares (bastante comuns), quadrados (com fundo semi-cônico) entre outros. (VON SPERLING, 2005).

O terceiro dispositivo citado anteriormente é o poço de sucção, como as vazões de esgoto afluente nas EEE não são constantes e variam conforme o consumo no decorrer do horário do dia, isto impossibilita um bombeamento contínuo em todo o dia. Dessa forma, é necessário um poço de acumulação para o posterior bombeamento, que também pode ser denominado como poço úmido, poço de acumulação ou poço de recepção. (TSUTIYA e ALEM SOBRINHO, 1999).

Por fim, os últimos dispositivos são o gerador de emergência e a extravazão por gravidade ou poço pulmão. Para Alem Sobrinho e Tsutiya (1999) estes tipos de dispositivos são utilizados para garantir a continuidade de escoamento de esgoto e não ocasionar o extravasamento.

Os geradores de emergência são soluções técnicas melhores, mas são mais onerosas do ponto de vista econômico. Já a extravazão por gravidade apresenta baixo custo de implantação se comparado com o gerador de emergência, mas apresenta o problema de poluição do corpo receptor no período prolongado de utilização.

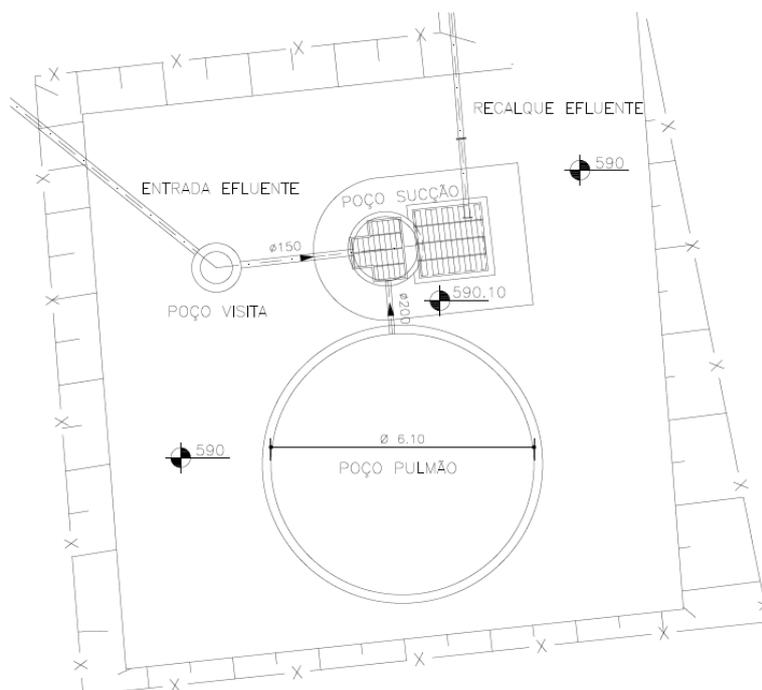
A extravazão por gravidade é aplicada em EEEs de pequeno porte, já que em EEEs de médio e grande porte demandam muito espaço físico e alto custo de implantação. Estes poços, reservatórios, podem ser constituídos de um ou mais poço conectados entre si com o poço de sucção. (ALEM SOBRINHO E TSUTIYA, 1999)

Segundo (SABESP, 2012) os geradores devem ser do tipo óleo diesel automático e dimensionamento para situações de falta de energia para um período mínimo de 3 horas, já o extravasor por gravidade ou poço pulmão dever possuir capacidade de retenção de no mínimo 2 horas para a vazão máxima horária.

## **ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ESGOTO DO MUNICÍPIO DE ITAÍ**

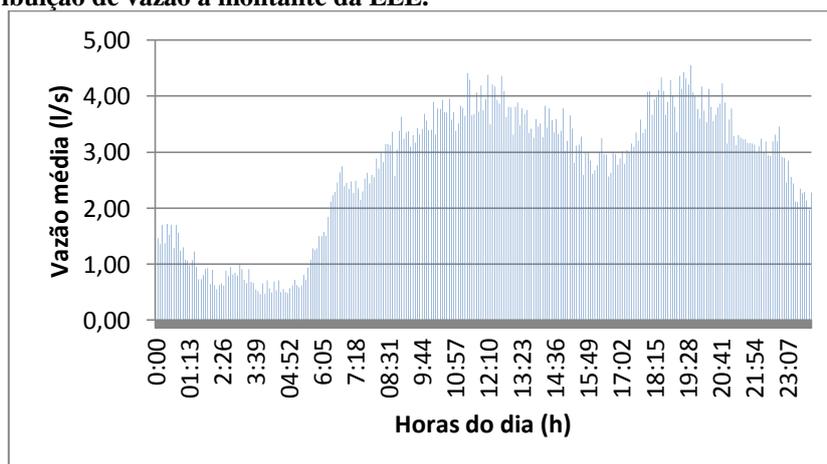
O município de Itaí está localizado no interior do Estado de São Paulo, e atualmente possui cerca de vinte mil habitantes. A estação elevatória de esgoto existente tem configuração convencional e há um poço de sucção, dois conjuntos moto-bomba do tipo submersa, e um poço pulmão. Todo o efluente da bacia se concentra em um poço de visita à montante da EEE. Em seguida, o efluente atinge o poço de sucção, local onde se encontram os conjuntos moto-bomba e cestos removíveis para a remoção de sólidos grosseiros. A tubulação de recalque é toda em ferro fundido, com a presença de registros e válvulas de retenção na saída do conjunto moto-bomba. O efluente é recalcado até um poço de visita existente, que permite o seu encaminhamento por gravidade até o interceptor que tem como destino final a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). A figura 2 apresenta croqui da área da EEE existente descrita anteriormente:

**Figura 2: Área de implantação da EEE existente.**



Na figura 3, apresenta-se a distribuição de vazões média de efluentes que chegam a EEE em estudo, esta bacia de esgotamento possui predominância residencial e os dados coletados foram referentes ao mês de Fevereiro de 2015. É possível observar que o principal período de geração de efluentes ocorre no período diurno.

**Figura 3: Distribuição de vazão a montante da EEE.**



Primeiramente, realizou-se testes iniciais com as características técnicas do poço de sucção existente, ou seja, conforme o cadastro apresentado na figura 2. As características do poço de sucção estão discriminadas na tabela 1, a seguir.

**Tabela 1: Dados do poço de sucção da EEE.**

VARIÁVEL	VALOR	UNIDADE
Nível Mínimo Operacional	0,30	m
Nível Máximo Operacional	1,45	m
Diâmetro do poço	1,50	m
Área do poço	1,77	m <sup>2</sup>

Volume útil	2,21	m <sup>3</sup>
Diâmetro do recalque	100,00	mm
Comprimento da tubulação de recalque	533,43	m

Uma análise preliminar demonstrou que o volume útil existente é pequeno para o armazenamento da vazão do efluente, principalmente no horário de ponta, o que poderá resultar em maior custo de energia elétrica diária na nova modalidade tarifária proposta. Este custo superior de energia elétrica diária ocorre quando se compara a operação vigente na modalidade convencional com a operação otimizada, que preconiza a modalidade horo-sazonal do sistema tarifário.

A modalidade tarifária horo-sazonal tem o objetivo de racionalizar o consumo de energia elétrica em determinadas horas do dia e estações do ano, e assim motivar o consumidor para a sua utilização no horário mais barato.

Dessa forma, optou-se pela utilização do poço pulmão, dispositivo existente, como novo poço de sucção já que este possui maior capacidade volumétrica para a operação. A tabela 2 demonstra tais características do novo poço de sucção.

**Tabela 2: Dados do poço pulmão da EEE.**

VARIÁVEL	VALOR	UNIDADE
Nível Mínimo Operacional	0,30	m
Nível Máximo Operacional	1,50	m
Diâmetro do poço	6,10	M
Área do poço	29,22	m <sup>2</sup>
Volume útil	35,07	m <sup>3</sup>
Diâmetro do recalque	100,00	mm
Comprimento da tubulação de recalque	533,43	m

Como será utilizado o poço pulmão como novo poço de sucção, serão necessárias novas adequações da EEE como a instalação de um gerador e novas interligações. O gerador terá a função de manter a operação do conjunto moto-bomba e não acarretar problemas de extravasamento de efluentes.

## **MATERIAL E MÉTODOS:**

O modelo matemático desenvolvido visa a minimização do custo com energia elétrica com a operação dos conjuntos moto bomba existentes de uma EEE no município de Itaí. Para a modelagem do problema foram consideradas as restrições impostas nas normas, manuais e as condições operacionais adequadas conforme foram descritas anteriormente.

As vazões afluentes na elevatória foram utilizadas como dados de entrada para o modelo. Estas foram determinadas através da medição do nível do poço de sucção existente, ou seja, na elevatória há transdutores de pressão que medem o nível de esgoto em relação ao fundo. Dessa forma, através da variação do nível de esgoto, da área de seção do poço de sucção e do intervalo de tempo é possível determinar as vazões afluentes.

## **TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO:**

O nome Pesquisa Operacional (PO) é de origem militar, tendo sido utilizado pela primeira vez na Grã-Bretanha durante a Segunda Guerra Mundial. O principal objetivo da aplicação era decidir sobre a utilização mais eficaz de recursos militares limitados. Têm-se, por exemplo, estudos relacionados com o desenvolvimento e uso do radar, problema de alocação eficiente de recursos escassos às várias operações militares, problema da dieta e outros mais.

Após a disseminação dos conceitos da Pesquisa Operacional, pós-guerra, houve aplicações nas indústrias para a gerência de sistemas e recursos nas organizações de grande porte.

Os problemas de PO consistem em modelar os sistemas reais existentes. Assim, esses modelos têm como finalidade analisar o comportamento desse sistema e o objetivo principal é levá-lo a se comportar de forma ótima.

Uma vez construído o modelo matemático parte-se para a obtenção de uma solução ótima. Diversos são os métodos matemáticos utilizados em PO e estes estão associados às várias áreas que compõem a PO.

Estes métodos matemáticos encontram-se em crescente evolução, além da descoberta de novas técnicas. Foram desenvolvidos diversos softwares, que disponibilizam alguns métodos importantes da Pesquisa Operacional tornando viável e eficiente a solução de problemas complexos.

Para problemas de pequeno a médio porte é possível utilizar o Solver da Frontline System, que se encontra disponibilizado no Microsoft Office Excel. O Solver é uma ferramenta muito utilizada para análise de sensibilidade com mais de uma variável e com restrições de parâmetros. Dessa forma, para este trabalho foi utilizado o Solver da Microsoft Office Excel.

### **PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR, INTEIRA E MISTA:**

A programação linear e a programação não linear possuem como objetivo a otimização das funções, ou seja, objetiva-se a maximização ou minimização da função objetivo. A principal diferença da programação não linear é a existência de alguma função não linear na função objetivo, ou nos parâmetros, ou nas restrições de igualdade e desigualdade.

Existem diversos algoritmos de programa para a otimização de programação não-linear, assim segundo Frontline (2015) o Solver, utilizado para ser utilizado neste trabalho, utiliza um dos algoritmos de programa mais robusto que se denomina GRG (Generalized Reduced Gradient).

Segundo Loesch e Hein (2011) os problemas de programação inteira e mista são, a princípio, estudados da mesma forma que um problema de programação linear, assim expande-se o alcance da programação linear. A principal característica é a presença de ao menos uma restrição de integridade. Entende-se por restrição de integridade imposta a uma variável a exigência de que assumam um valor inteiro.

Dessa forma, se todas as variáveis do problema forem inteiras leva-se a um problema de programação inteira, já se algumas das variáveis do problema não sejam inteiras, acarreta um problema de programação mista.

Na proposta deste trabalho, o acionamento ou não (liga/desliga) da bomba da estação elevatória de esgoto ocasiona uma decisão binária, ou seja, o valor 0 representa que a bomba está desligada e o valor 1 representa que a bomba está ligada. Dessa forma a otimização da operação da EEE representa uma programação não-linear, inteira e mista.

### **EQUACIONAMENTO DO PROBLEMA:**

Através das equações básicas de conduto forçado da hidráulica é possível realizar o planejamento para o acionamento da bomba de uma Estação Elevatória de Esgoto. O campo de solução de tal problema está na decisão em acionar ou não a bomba em um determinado intervalo de tempo discretizado.

Para a modelagem do problema foram necessárias certas simplificações: os intervalos de tempo foram discretizados de 5 em 5 minutos. Utilizou-se 5 minutos como intervalo de tempo mínimo na discretização, pois recomendações bibliográficas sugerem tempo de ciclo de 10 minutos, ou seja, é composto por intervalo de funcionamento de 5 minutos e intervalo parado de 5 minutos. Assim, esse intervalo é um instante fixo sem variações ao longo dos 5 minutos. Também se levou em consideração a capacidade de bombeamento do conjunto moto bomba já que esta não pode esgotar todo o volume útil, do poço de sucção, no intervalo de tempo considerado.

A otimização levou em conta a presença de uma bomba centrífuga, e estas possuem como característica a relação de altura manométrica pela vazão bombeada variável, ou seja, a vazão varia conforme há variações na altura manométrica. Para o modelo proposto o ponto de operação da bomba foi fixado em um único valor, esta simplificação é viável uma vez que a adequação do poço de sucção acarretará pouca variação da altura geométrica, já que o novo poço de sucção terá o diâmetro quatro vezes maior que o diâmetro do poço de sucção existente.

Com relação ao tempo de detenção hidráulica do esgoto sanitário, não foi imposta restrição para o acionamento do conjunto moto bomba em um período máximo de tempo, pois a estação elevatória de esgoto se encontra em local isolado e não há problemas de exalar odores no local.

O modelo tem como objetivo principal a minimização do custo com energia elétrica através da diferenciação da tarifa nos horários de ponta e fora de ponta, e a variação de efluente ao longo de um dia (24 horas).

A seguir as equações matemáticas que definem o problema de funcionamento da EEE:

### **VAZÃO AFLUENTE A EEE**

A vazão foi determinada através de medições do nível do poço de sucção em relação ao fundo do mesmo. Para a medição utilizou-se de transdutores de pressão que realizam a medida do nível a cada minuto. Através dos dados coletados foi possível observar que as medições possuem regularidade de valores no mesmo período do dia.

### **PERDA DE CARGA**

A perda de carga utilizada para esse modelo é a de Hazen Willians e conforme Netto, (1998) é uma fórmula empírica muito utilizada na engenharia sanitária.

$$J = 10,65 * Q_{b,t}^{1,85} * C^{-1,85} * D^{-4,87} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

J: Perda de carga unitária (m/m)

$Q_{b,t}$ : Vazão bombeada no intervalo de tempo t (m<sup>3</sup>/s);

C: Coeficiente de Hazen Willians;

D: Diâmetro da tubulação de linha de recalque (m);

### **BALANÇO HÍDRICO NO POÇO DE SUCÇÃO**

Deve-se manter o balanço hídrico no poço de sucção em todos os intervalos, ou seja, a diferença entre as vazões de entrada e as vazões de saída do poço de sucção que multiplicado pelo intervalo de tempo t, deve ser numericamente igual a variação de nível no poço de sucção multiplicado pela área da base do poço de sucção. Tais considerações são para situações na qual a seção transversal do volume útil seja constante.

$$Q_{e,t} - (Q_{b,t} * n_{bin,t}) = (N_{f,t} - N_{i,t}) * (A / t) \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

$n_{bin,t}$ : Acionamento ou não do conjunto moto-bomba no intervalo t (binário) ;

$N_{f,t}$ : Nível de esgoto no poço de sucção no final do intervalo t (m);

$N_{i,t}$ : Nível de esgoto no poço de sucção no início do intervalo t (m);

A: Área da seção transversal do poço de sucção (m<sup>2</sup>);

t: Duração do intervalo de tempo (h);

## NÍVEL MÁXIMO E MÍNIMO OPERACIONAL DO POÇO DE SUCÇÃO

Os níveis máximos e mínimos do poço de sucção características dos projetos nas quais interferem no modelo através de restrições. Alterações em tais características garantem a factibilidade operacional para a otimização do modelo.

$$N_{\min} \leq N_{f,t} \leq N_{\max} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

$N_{\min}$ : Nível mínimo operacional do poço de sucção (m);

$N_{\max}$ : Nível máximo operacional do poço de sucção (m);

## POTÊNCIA E ENERGIA

A potência do conjunto moto-bomba é uma relação entre a altura manométrica, o rendimento do conjunto moto-bomba e da vazão de recalque para cada instante. Como forma de simplificar o equacionamento foi admitido que a vazão de bombeamento se mantivesse com uma pequena variação da altura manométrica de recalque. Esta simplificação é bastante razoável uma vez que as vazões acima ou abaixo do valor preestabelecido se compensem ao longo do dia, além do fato de ocorrer pequena variação do nível do poço de sucção já que o mesmo possui seção transversal grande quando comparado com a vazão afluente no decorrer do dia. Assim a energia necessária para a operação do conjunto moto-bomba é o produto da potência pelo tempo de operação.

$$E_t = P_t * n_{bin,t} * t \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$E_t$ : Energia requerida no intervalo t (KWh);

$P_t$ : Potência requerida no intervalo t (KW);

## CUSTO DE BOMBEAMENTO

O custo da energia elétrica a cada intervalo de tempo é obtido através do produto da energia elétrica requerida pelo custo da energia elétrica no intervalo de tempo correspondente. Assim com esta metodologia é possível obter custos diferenciados a cada intervalo de tempo, e dessa forma o modelo permite priorizar o bombeamento em períodos nas quais o custo de energia elétrica é menor.

$$C_{E,t} = E_t * P_{E,t} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

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

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

## FUNÇÃO OBJETIVO

O objetivo deste modelo é a minimização do custo com energia elétrica, e atender todas as restrições para a operação da estação elevatória de esgoto. Assim a função objetivo e pode ser definida por:

$$CE = \text{MIN} \sum_{i=1}^{24} P_{E,t} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

CE: Custo total ao longo de um dia com energia elétrica (R\$);

## RESULTADOS:

Através das técnicas de otimização e os equacionamentos descrito anteriormente foi possível elaborar um modelo que permitiu a operação ótima na EEE em análise. Utilizou-se a planilha Microsoft Excel, Solver, devido à facilidade de modelagem e flexibilidade dos dados de entrada.

Como o Solver que já vem incluso como complemento no Microsoft Office Excel possui um limite de 200 células variáveis de decisão e 100 células de restrições segundo Frontline (2015), optou-se por realizar a otimização em blocos com o limite das células variáveis de decisão e células de restrições. Dessa forma, foram realizados 6 blocos cada um correspondendo a 4 horas de operação da EEE a serem otimizados com a interdependência entre o nível final da EEE do bloco precedente com o nível inicial do bloco subsequente.

A utilização de blocos de otimização pode resultar em uma solução que não se obtém a melhor minimização da função objetivo já que o problema está segmentado. Optou-se por tal solução já que há limitações de licença livre do software incluso no Microsoft Office Excel.

Na Tabela 3 é apresentado o mapa de operação da EEE, na qual as células com o número 1 indicam que a bomba está ligada e as células com o número 0 indicam que a bomba esta desligada. Assim para um horizonte de planejamento de 24 horas, 288 intervalos, a bomba da EEE ficou no estado ligado durante 124 intervalos, representando 43,05% do tempo.

**Tabela 3: Mapa de acionamento da bomba na EEE.**

INTERVALO DA HORA DO DIA	00:00 - 05:00	05:00 - 10:00	10:00 - 15:00	15:00 - 20:00	20:00 - 25:00	25:00 - 30:00	30:00 - 35:00	35:00 - 40:00	40:00 - 45:00	45:00 - 50:00	50:00 - 55:00	55:00 - 00:00
00:00 - 01:00	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
01:00 - 02:00	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
02:00 - 03:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
03:00 - 04:00	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00 - 05:00	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
05:00 - 06:00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
06:00 - 07:00	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1
07:00 - 08:00	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
08:00 - 09:00	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1
09:00 - 10:00	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
10:00 - 11:00	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1
11:00 - 12:00	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
12:00 - 13:00	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
13:00 - 14:00	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0
14:00 - 15:00	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
15:00 - 16:00	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0
16:00 - 17:00	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1
17:00 - 18:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18:00 - 19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
19:00 - 20:00	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1
20:00 - 21:00	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1
21:00 - 22:00	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
22:00 - 23:00	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
23:00 - 00:00	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0

Na tabela 3, o intervalo da hora do dia compreendido das 18:00hs até 21:00 possuem hachura em vermelho pois indicam o horário de ponta do sistema tarifário horo-sazonal.

Para o período compreendido entre 17:00 às 18:00hs, tabela 3, notou-se a busca do esvaziamento do poço de sucção, ou seja, manter o nível do poço mais baixo para o próximo instante. Como a energia é mais cara no próximo intervalo, inicia-se o período de ponta, imagina-se que o nível do poço deveria ficar próximo do máximo e ocorrer menos acionamentos, contudo a vazão de entrada de efluentes neste período também é elevada e acarretou a necessidade do acionamento do conjunto moto bomba.

Na mesma tabela 3, é possível observar que houve o acionamento do conjunto moto bomba no último período do horário de ponta e a mesma se encontra desligada às 21:00hs. Esta situação é decorrente do limite do nível máximo do poço de sucção e a necessidade de atender todas as restrições impostas ao problema.

Outro resultado analisado foi em função da energia elétrica requerida, ou seja, o custo em reais do bombeamento para cada instante. A Tabela 4 representa o custo diário, em reais, do bombeamento da EEE.

**Tabela 4: Mapa de custos de bombeamento da EEE.**

INTERVALO DA HORA DO DIA	00:00 - 05:00	05:00 - 10:00	10:00 - 15:00	15:00 - 20:00	20:00 - 25:00	25:00 - 30:00	30:00 - 35:00	35:00 - 40:00	40:00 - 45:00	45:00 - 50:00	50:00 - 55:00	55:00 - 00:00
00:00 - 01:00	0,1140	0,0000	0,0000	0,0000	0,1140	0,0000	0,0000	0,0000	0,1140	0,0000	0,0000	0,0000
01:00 - 02:00	0,1140	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1140	0,0000	0,0000	0,0000	0,1141	0,0000
02:00 - 03:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1140	0,0000
03:00 - 04:00	0,0000	0,0000	0,1141	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
04:00 - 05:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,1140	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1141
05:00 - 06:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1141	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
06:00 - 07:00	0,0000	0,0000	0,1140	0,0000	0,0000	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000	0,0000	0,1140
07:00 - 08:00	0,0000	0,1140	0,0000	0,0000	0,1140	0,0000	0,0000	0,1140	0,1141	0,0000	0,0000	0,1141
08:00 - 09:00	0,0000	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,1142	0,0000	0,1142	0,0000	0,1141	0,0000	0,1142
09:00 - 10:00	0,0000	0,1141	0,0000	0,1141	0,0000	0,1141	0,0000	0,1141	0,0000	0,1141	0,1142	0,0000
10:00 - 11:00	0,0000	0,1141	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,1141	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,1141
11:00 - 12:00	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,1140	0,0000	0,1140	0,1141	0,0000	0,1140
12:00 - 13:00	0,0000	0,1140	0,1140	0,1141	0,0000	0,1141	0,0000	0,1140	0,1141	0,0000	0,1140	0,0000
13:00 - 14:00	0,1140	0,1140	0,1141	0,0000	0,1141	0,0000	0,1141	0,1142	0,0000	0,0000	0,1140	0,0000
14:00 - 15:00	0,1140	0,0000	0,1140	0,1141	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140
15:00 - 16:00	0,1140	0,0000	0,1141	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,1141	0,0000	0,1142	0,0000	0,0000
16:00 - 17:00	0,0000	0,1140	0,1141	0,0000	0,1141	0,0000	0,1141	0,0000	0,1141	0,1143	0,1144	0,1145
17:00 - 18:00	0,1146	0,1147	0,1148	0,1149	0,1150	0,1152	0,1153	0,1154	0,1155	0,1156	0,1157	0,1158
18:00 - 19:00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5514
19:00 - 20:00	0,0000	0,0000	0,5506	0,0000	0,0000	0,5496	0,5499	0,0000	0,5495	0,5498	0,0000	0,5496
20:00 - 21:00	0,5500	0,0000	0,5498	0,5502	0,0000	0,5499	0,5504	0,0000	0,5502	0,0000	0,5499	0,5503
21:00 - 22:00	0,0000	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000
22:00 - 23:00	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000
23:00 - 00:00	0,1140	0,0000	0,1140	0,0000	0,0000	0,1140	0,1141	0,0000	0,0000	0,1141	0,0000	0,0000

Através da tabela 4 obteve-se como resultado um custo diário de um bombeamento otimizado de R\$20,70.

É possível notar que o custo com bombeamento de um determinado intervalo sofreu variações, tal fato ocorreu devido à diferença de potência requerida pelo conjunto moto-bomba. No intervalo de 18:00hs até 21:00hs o

custo de bombeamento é diferenciado devido ao fato da tarifação de energia elétrica cobrada ser em função do horário de consumo.

## **CONCLUSÃO:**

Os resultados obtidos foram a favor da segurança já que foram utilizadas simplificações como o instante fixo, o ponto fixo de operação da bomba e a utilização da fórmula de Hazen Williams para obtenção de perda de carga.

O objetivo deste trabalho foi a redução dos custos de energia elétrica para a operação da EEE. Conforme pode ser observado na tabela 3, no período de ponta foi possível utilizar o poço de sucção para o acúmulo de efluente já que no período anterior houve o funcionamento contínuo do conjunto moto-bomba com a meta de esvaziar o “reservatório” para o próximo período, de ponta.

A EEE possuía em Fevereiro de 2015 um gasto diário médio com energia elétrica de R\$ 23,79, com o modelo de bombeamento otimizado o gasto diário ficou em R\$20,70. Assim, pode-se observar que houve um decréscimo no custo de energia elétrica de 12,98%.

Salienta-se que foi utilizado o poço pulmão como poço de sucção, assim serão necessárias adequações na EEE como a instalação de um grupo gerador e novas interligações. Portanto, seria necessário contabilizar o custo de implantação e aquisição de tais equipamentos para viabilizar as modificações.

## **RECOMENDAÇÕES:**

Com os resultados obtidos é possível notar que há possibilidade de redução no consumo de energia elétrica na fase operacional. Assim se o volume do poço de sucção fosse levado em consideração na fase de projetos poderia promover reduções futuras com as despesas operacionais.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

1. ALEM S.P.; TSUTIYA, M.T. Coleta e transporte de esgoto sanitário. São Paulo: Winner Graph, 1999. 548 p.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR12.208: Projeto de estações elevatórias de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: Abnt, 1992.
3. COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Caderno técnico para elaboração de projetos dos sistemas de água e esgotos em empreendimentos imobiliários: Requisitos básicos para elaboração de projetos dos sistemas de água e esgotos em empreendimentos imobiliários. 1 ed. São Paulo: Sabesp, 2012. 50 p.
4. FRANCATO, A.L. et al. A eficiência energética na operação ótima de estações elevatórias de esgoto. Revista DAE, ed. 185, p. 29-34, 2011.
5. FRONTLINE, (Org.). Excel solver - GRG nonlinear solving method stopping conditions. 2015. Disponível em: <<http://www.solver.com/excel-solver-grg-nonlinear-solving-method-stopping-conditions>>. Acesso em: 18 nov. 2015.
6. IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística (Org.). Censo 2010. 2010. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/temas.php?lang=&codmun=352180&idtema=97&search=sao-paulo|itai|censo-demografico-2010:-resultados-da-amostra-migracao-->>>. Acesso em: 25 nov. 2010.
7. LOESCH, C.; HEIN, N. Pesquisa operacional: Fundamentos e Modelos. São Paulo: Saraiva, 2011. 248 p.
8. VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 452 p.