Julio Cesar Arantes Perroni

AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA
ELÉTRICA PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA – O CASO DO ABASTECIMENTO
PÚBLICO DA CIDADE DE SÃO CARLOS - SP

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Edson C. Wendland

São Carlos
2005

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

P459a Perroni, Julio Cesar Arantes
Avaliação do consumo de energia elétrica para
produção de água subterrânea : o caso do abastecimento
público da cidade de São Carlos - SP / Julio Cesar
Arantes Perroni. -- São Carlos, 2005.

Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Edson C. Wendland.

1. Poço profundo. 2. Poço tubular. 3. Bomba de eixo
prolongado. 4. Bomba submersa. 5. Rendimento.
6. Eficiência energética. 7. Bombeamento eficiente.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Geólogo JULIO CESAR ARANTES PERRONI

Dissertação defendida e julgada em 23-02-2005 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. EDSON CEZAR WENDLAND (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. FREDERICO FÁBIO MAUAD
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. JOSÉ ELOI GUIMARÃES CAMPOS
(Universidade de Brasília)

APROVADO

Profª. Titular MARIA DO CARMO CALIJURI
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico e ofereço à minha esposa Célia Amaral Perroni, motivadora
e companheira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos amigos Prof. Dr. José Eduardo Rodrigues, Prof. Dr. José Antonio Teixeira (aposentado), ambos do Departamento de Geotecnia – EESC / USP, pelo incentivo e apoio à minha integração junto ao programa de pós-graduação.

Agradeço aos professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento - EESC / USP: Fazal Hussain Chaudhry, Luisa Fernanda Ribeiro Reis, Marcelo Pereira de Souza, Marcius Fantozzi Giorgetti e ao professor visitante Otto D.L. Strack, por terem tornado o meu retorno à USP, como aluno, após 28 anos, uma experiência agradável e profícua.

Agradeço a colaboração, sugestões e orientações da equipe de engenheiros do SAAE – São Carlos, liderado pelo Prof. Dr. Jurandyr Povinelli – Diretor Superintendente, em especial, os engenheiros Gilberto Ferreira França, Benedito Carlos Marchezin e Alceu Walter de Cardoso Jr.

Agradeço minha filha Carina Amaral Perroni que colaborou com a digitação das tabelas de dados.

Agradeço as contribuições e sugestões dos Profs. Drs. Rodrigo de Mello Porto e Frederico Fábio Mauad (SHS/EESC/USP) e do Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos (UnB).

Agradeço a colaboração dos colegas de pós-graduação José Eduardo Quaresma e José Anderson do Nascimento Batista.

Agradeço especialmente ao Prof. Dr. Edson Wendland, além de orientador, amigo e incentivador.

Tantas vezes pensamos ter chegado, tantas vezes é preciso ir além.

Fernando Pessoa

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	2
2. OBJETIVOS	6
2.1. Objetivo geral	6
2.2. Objetivos específicos	6
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
3.1. Eficiência energética em sistemas de saneamento.....	8
3.2. Estratégias para redução do custo de energia	9
3.3. Operação otimizada de sistemas de bombeamento	11
3.4. Emprego de variadores de rotação em equipamentos de bombeamento	12
3.5. Dimensionamento de sistemas de bombeamento para poços tubulares..	19
3.6. Métodos para avaliação de poços e respectivos equipamentos de bombeamento	23
4. METODOLOGIA	28
4.1. Seleção da área de estudo e coleta de dados	28
4.2. Avaliação hidrogeológica	29
4.3. Avaliação da evolução da performance dos poços e equipamentos de bombeamento	29
4.4. Avaliação do consumo de energia elétrica	31
4.4.1. Cálculo da altura manométrica	32
4.4.2. Cálculo do rendimento η_1	34
4.4.3. Cálculo do rendimento η_2	35

4.5. Elaboração de propostas para otimização do sistema e redução do custo operacional	36
5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	38
5.1.1. Evolução da demanda de água.....	40
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
6.1. Avaliação hidrogeológica	43
6.1.1. Feições geológicas da área.....	43
6.1.2. Caracterização dos aquíferos.....	46
6.1.3. Dados gerais dos poços do SAAE	48
6.1.4. Análise da exploração atual dos aquíferos na área	52
6.1.5. Balanço entre a disponibilidade e o consumo de água subterrânea na área	59
6.1.6. Análise da evolução do comportamento do aquífero	60
6.1.7. Hidroquímica e qualidade da água.....	65
6.2. Análise da performance dos poços.....	67
6.3. Análise dos sistemas de bombeamento dos poços.....	100
6.3.1. Características dos sistemas de bombeamento	100
6.3.2. Avaliação do rendimento dos sistemas de bombeamento.....	104
6.3.3. Despesas com energia elétrica nos sistemas de bombeamento.....	109
6.4. Soluções para otimização do sistema	111
6.4.1. Utilização de equipamentos de bombeamento de alto rendimento	111
6.4.2. Redimensionamento dos sistemas de bombeamento	114
6.4.3. Modernização dos sistemas de acionamento e automação	117
6.4.4. Medidas complementares para reduzir o custo de energia elétrica... ..	119
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

LISTA DE FIGURAS

<i>número</i>	<i>página</i>
Figura 1: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com partida direta, adaptado de GRUNDFOS (1996).	13
Figura 2: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com acionamento tipo estrela-triângulo, adaptado de GRUNDFOS (1996).....	14
Figura 3: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com autotransformador, adaptado de GRUNDFOS (1996)...	15
Figura 4: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com partida suave, adaptado de GRUNDFOS (1996).....	16
Figura 5: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com inversor de frequência, adaptado de GRUNDFOS (1996).	17
Figura 6: Decomposição das perdas de carga do poço, segundo Jacob (1947), figura adaptada de FEITOSA & MANOEL FILHO (2000).	21
Figura 7: Gráfico esquemático das curvas de demanda do sistema (poço) e curvas de performance da bomba (adaptado de LÜDECKE & BOLDT, 2004).....	22
Figura 8: Esquema ilustrativo dos componentes da altura manométrica total (AMT)	33
Figura 9: Gráfico com dados fornecidos pelo SAAE de produção mensal de água superficial e subterrânea, no período de 1994-2004, para abastecimento da cidade de São Carlos	41
Figura 10: Mapa geológico simplificado da área da cidade de São Carlos (adaptado de Aguiar, 1989).....	46
Figura 11: Planta da área de São Carlos, com representação do substrato geológico, indicação da localização, número de identificação e profundidade útil (m) dos poços do SAAE.....	51
Figura 12: Planta com gráficos das vazões outorgadas de poços públicos e particulares da cidade de São Carlos. Fonte: DAEE – Araraquara.	58

Figura 13: Gráfico da evolução do nível piezométrico dos poços do SAAE, nos últimos 20 anos.....	61
Figura 14: Mapa hidrogeológico com superfície piezométrica e direções de fluxo e gráficos de produção mensal dos poços do SAAE do Aquífero Guarani em 2003.	63
Figura 15: Seção geológica vertical na direção SW-NE, cuja localização é indicada na Figura 16, com indicação dos perfis dos poços, nível piezométrico, área de recarga e seção estrangulada do Aquífero Guarani.	64
Figura 16: Gráfico de evolução da performance do poço nº 02 – Antonio Fisher dos Santos.....	68
Figura 17: Gráfico de evolução da performance do poço nº 05 – Distrito Industrial	70
Figura 18: Gráfico de evolução da performance do poço nº 08 - Samambaia	72
Figura 19: Gráfico de evolução da performance do poço nº 09 – Maria Stella Fagá.....	74
Figura 20: Gráfico de evolução da performance do poço nº 11 – Azulville II.....	76
Figura 21: Gráfico de evolução da performance do poço nº 12 – São Carlos III.....	78
Figura 22: Gráfico de evolução da performance do poço nº 14 – Parque Faber.....	80
Figura 23: Gráfico de evolução da performance do poço nº 15 – Santa Felícia.....	82
Figura 24: Gráfico de evolução da performance do poço nº 16 – Boa Vista	84
Figura 25: Gráfico de evolução da performance do poço nº 17 – Cidade Aracy.....	86
Figura 26: Gráfico de evolução da performance do poço nº 18 – Santa Eudóxia	88
Figura 27: Gráfico de evolução da performance do poço nº 19 - Tramer	90
Figura 28: Gráfico de evolução da performance do poço nº 20 – Vila Nery	92
Figura 29: Gráfico de evolução da performance do poço nº 21 – Cruzeiro do Sul	94
Figura 30: Gráfico de evolução da performance do poço nº 22 – Parque Fehr.....	96
Figura 31: Gráfico de evolução da performance do poço nº 23 - Jockey Club II.....	98
Figura 32: Comparação entre os valores (η_1) e (η_2) do rendimento eletromecânico dos sistemas de bombeamento dos poços	108

Figura 33: Desenho esquemático de sistema de recalque com bomba em linha e bomba submersa com central de controle de motores e inversores de frequência.	117
---	-----

LISTA DE TABELAS

<i>número</i>	<i>página</i>
Tabela 1: Sumário dos dados do poço a serem monitorados durante a operação, reproduzido de JORBA & ROCHA (1982)	24
Tabela 2: Sumário dos dados do conjunto de bombeamento a serem monitorados durante a operação, reproduzido de JORBA & ROCHA (1982)	24
Tabela 3: Empresas responsáveis pelos relatórios dos serviços de manutenção dos poços do SAAE	30
Tabela 4: Dados gerais das captações superficiais	38
Tabela 5: Dados gerais do sistema de saneamento ambiental da cidade de São Carlos	39
Tabela 6: Parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Guarani, determinados nos poços do SAAE de São Carlos	48
Tabela 7: Dados gerais dos poços tubulares do SAAE	50
Tabela 8: Outorgas de direito de uso da água dos poços do SAAE	53
Tabela 9: Poços com outorga de direito de uso da água – Aquífero Bauru	54
Tabela 10: Poços com outorga de direito de uso da água – Aquífero Serra Geral	55
Tabela 11: Poços com outorga de direito de uso da água – Aquífero Guarani	55
Tabela 12: Nível estático dos poços do SAAE	60
Tabela 13: Resultados de análises químicas de água subterrânea em poços da cidade de São Carlos	66
Tabela 14: Resumo da avaliação das séries históricas de dados dos poços.	99
Tabela 15: Equipamentos de bombeamento dos poços do SAAE	101
Tabela 16: Resumo da potência por fabricante das bombas dos poços do SAAE	102
Tabela 17: Condições de instalação das bombas dos poços	103
Tabela 18: Valores médios de vazão (Q), nível dinâmico (ND), perdas de carga, altura manométrica total (AMT) e potência consumida, por poço, obtidos dos dados de monitoramento dos poços no ano de 2003	105

Tabela 19: Valores médios calculados de energia consumida e de produção mensal de água do ano de 2003	106
Tabela 20: Valores de rendimento eletromecânico calculados com base nos dados da Tabela 16 (η_1) e Tabela 17 (η_2)	107
Tabela 21: Despesas de energia elétrica dos sistemas de bombeamento dos poços	110
Tabela 22: Projeção da redução do consumo de energia elétrica com 65% de rendimento em todos os sistemas de bombeamento dos poços	112
Tabela 23: estimativa da redução das despesas com energia elétrica em 5 anos, com taxa anual de juros de 15%	113

RESUMO

PERRONI, J.C.A. (2005). *Avaliação do consumo de energia elétrica para produção de água – O caso do abastecimento público da cidade de São Carlos – SP*. 145p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Diversos sistemas públicos de abastecimento de água de cidades brasileiras utilizam majoritária ou exclusivamente água subterrânea, captada em poços tubulares profundos sendo que a grande maioria desses poços necessita de equipamentos de bombeamento para efetuar a elevação da água até a superfície com custo operacional elevado relativo às despesas com energia elétrica.

No presente trabalho, foi desenvolvida uma metodologia para análise de dados operacionais de poços e respectivos sistemas de bombeamento, incluindo a determinação do rendimento eletromecânico dos equipamentos utilizados. A aplicabilidade da metodologia proposta foi avaliada através de estudo de caso, realizado com 21 poços utilizados no abastecimento público da cidade de São Carlos - SP.

Os resultados obtidos indicaram que com a utilização de equipamentos de bombeamento de alto rendimento, será possível reduzir 15% do consumo de energia elétrica, proporcionando uma redução de despesa que poderá cobrir, em 5 anos, mais de 50% dos valores dos investimentos necessários em novos equipamentos.

Tendo como diretrizes gerais a otimização do rendimento de poços profundos e a sustentabilidade do uso da água subterrânea a aplicação da metodologia proposta, em sistemas de abastecimento de água, deverá contribuir para a melhoria da qualidade dos serviços e poderá gerar uma significativa economia de recursos.

Palavras chave: poço profundo, poço tubular, bomba de eixo prolongado, bomba submersa, rendimento, eficiência energética, bombeamento eficiente.

ABSTRACT

PERRONI, J.C.A. (2005). *Evaluation of electric power consumption in groundwater pumping – The case study of the city of São Carlos – SP*. 145p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Several public water supply systems of Brazilian cities use mainly or exclusively groundwater from water wells, which majority needs pumping equipments to raise the water to the ground surface, and high operating costs due to electricity consumption.

In the present work, a methodology to evaluate water wells and pumping equipments operational data was developed, including the calculation of the electromechanical efficiency. The applicability of the proposed methodology is evaluated in a case study of 21 water wells, which are used for public water supply of the city of São Carlos – SP.

The results have indicated that the use of high level efficiency equipment should reduce 15% of the present electric power consumption and an economy that in a 5 years period could support more than 50% of the necessary investments in new pumping equipment.

Taking the optimization of the energy efficiency of water wells and the sustainability of groundwater as general constrains, the application of the proposed methodology may contribute to the improvement of the quality of public water supply facilities and generate a considerable economy.

Keywords: water well, drive shaft pump, energy efficiency, pumping efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Os serviços públicos de saneamento básico se expandiram no Brasil a partir da década de 70, buscando atender a demanda decorrente do acentuado crescimento da população urbana e da industrialização. As obras para abastecimento de água foram priorizadas pelo Plano Nacional de Saneamento (PLANASA), com financiamentos provenientes do Fundo de Garantia por Tempo de Serviço (FGTS) e pelas Companhias Estaduais de Saneamento Básico (CESB's).

Nesse contexto foram construídos inúmeros poços tubulares destinados ao abastecimento público em áreas urbanas de, praticamente, todo o território nacional, sendo pioneira a região semi-árida do Nordeste, onde a perfuração de poços tubulares foi iniciada na década de 60.

No Estado de São Paulo a construção de poços profundos se expandiu na década de 70 e se manteve bastante ativa até a década de 90, tanto nos municípios operados pela SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, como naqueles abastecidos por órgãos municipais, por representarem vantagens comparativas no valor dos investimentos. Nesse período, o DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica, com auxílio de consultores israelenses, realizou um amplo estudo do potencial de água subterrânea em todo o estado e definiu as principais diretrizes de aproveitamento, com ênfase no abastecimento público. Atualmente, os poços profundos já representam parcelas majoritárias da água utilizada para o abastecimento público em grande número de cidades paulistas e essa participação tende a crescer.

A extração da água na grande maioria dos poços utilizados no abastecimento público é feita com auxílio de conjuntos motor-bomba, para elevação da água até a superfície ou para efetuar adicionalmente a elevação até os reservatórios de

distribuição ou para alcançar a pressão necessária para injeção direta na rede de distribuição. O consumo de energia pode ser elevado e o valor presente do custo operacional com energia elétrica, ao longo da vida útil, pode ultrapassar o próprio custo inicial de construção do poço. As ameaças de crise de abastecimento e a elevação das tarifas de energia, ocorridas nos últimos anos, representam fortes motivações para as empresas e órgãos de saneamento buscarem a redução desse que, em geral, é o seu segundo item na matriz de custos. Todavia, os estudos de otimização de sistemas de bombeamento dos poços ainda não são práticas usuais das empresas e órgãos de saneamento, principalmente, por falta de conhecimento técnico específico sobre o assunto.

O crescimento da parcela da água subterrânea utilizada para abastecimento público no Estado de São Paulo, não gerou um crescimento correspondente do número de profissionais com capacitação técnica e treinamento para a operação de poços. Pelo contrário, a estrutura implantada no DAEE na década de 1970, foi sendo gradualmente reduzida, mesmo com a criação de novas atribuições legais de fiscalização da aplicação das leis de gestão de recursos hídricos. Atualmente, a estrutura da autarquia é totalmente insuficiente para atender a demanda dos órgãos municipais de saneamento e esses, em geral, não implantaram estruturas próprias que pudessem eliminar a dependência técnica do estado. A falta de infra-estrutura técnica relativa à construção, operação e manutenção de poços, é comum mesmo nos municípios abastecidos com água subterrânea.

Os registros históricos de dados resultantes de programas de monitoramento e de gerenciamento operacional de poços, os quais constituem obrigação legal, são, em geral, encarados como atividade burocrática e, devido à falta de pessoal para analisar tecnicamente os dados coletados, tão logo quanto possível, são transferidos definitivamente para o “arquivo morto”. Todavia, esses dados poderiam fornecer importantes informações sobre a performance do aquífero, dos poços e dos respectivos sistemas de bombeamento e fornecer diretrizes para redução de desperdícios de energia e melhoria da eficiência operacional.

O objetivo desse trabalho foi o de desenvolver e testar uma metodologia prática para avaliar o consumo de energia elétrica nos equipamentos de bombeamento de poços profundos utilizados em sistemas públicos de abastecimento de água, com base em séries históricas de dados operacionais e de monitoramento.

A cidade de São Carlos, onde cerca de 50% da água utilizada pelo órgão municipal de saneamento - o SAAE- Serviço Autônomo de Água e Esgoto - é proveniente de poços tubulares, foi escolhida para o presente estudo de caso. O trabalho se baseou na análise dos dados operacionais disponíveis dos poços tubulares utilizados pelo SAAE e os respectivos equipamentos de bombeamento.

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo é desenvolver e testar uma metodologia prática para avaliação do consumo de energia elétrica para produção de água subterrânea com base na análise de registros de dados operacionais existentes.

A metodologia foi aplicada em um estudo de caso com dados da cidade de São Carlos, analisando a eficiência dos poços que abastecem a cidade e seus respectivos equipamentos de bombeamento e propondo medidas visando à otimização do consumo de energia elétrica e a redução do custo operacional.

2.2. Objetivos específicos

Elaborar um diagnóstico do estado da arte, com base na bibliografia nacional e internacional, sobre eficiência energética em sistemas de bombeamento de poços tubulares.

Elaborar uma proposta de metodologia prática para avaliação da eficiência de poços e respectivos sistemas de bombeamento, com base em dados operacionais existentes.

Coletar e analisar os dados operacionais dos poços utilizados pelo SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto, para abastecimento da cidade de São Carlos.

Elaborar um diagnóstico do consumo de energia elétrica e o custo operacional para o sistema de produção de água subterrânea em São Carlos e recomendações para sua otimização.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Eficiência energética em sistemas de saneamento

QUALITY TONNES (2004) registra que existe uma tendência internacional de crescimento da preocupação com a eficiência de sistemas de saneamento devido à grande parcela do consumo de energia que esse setor representa. Os autores indicam que, a partir da assinatura, em 1998, do protocolo GHG (Greenhouse Gas) para redução da emissão de gases e controle do efeito estufa, os planos de otimização da eficiência energética na área de saneamento adotaram como indicador o cálculo do consumo de energia por metro cúbico de água produzida (kWh/m^3) que é multiplicado pela carga de carbono da energia utilizada (CO_2 por kWh). O índice de consumo específico de energia é utilizado para aferir a eficiência energética de um sistema antes e após a implementação de melhorias.

No Brasil, desde 1983, com o início do aumento gradativo das tarifas de energia elétrica, diversas ações vêm sendo desenvolvidas por grandes órgãos de saneamento como a SABESP – Companhia de Saneamento de São Paulo, no sentido de reduzir as despesas com energia elétrica. Com os constantes aumentos de tarifa e após a recente crise de oferta, a preocupação com a eficiência energética dos sistemas de saneamento se ampliou e atinge atualmente mesmo os pequenos órgãos municipais de saneamento (TSUTIYA, 2001).

A eficiência energética em sistemas de saneamento é objeto de um manual de orientação do PROCEL/ELETROBRÁS, no qual são abordados os potenciais desperdícios de energia nas diversas etapas do sistema de abastecimento, incluindo captação, transporte, tratamento, armazenamento e distribuição (BAHIA, 1998). O trabalho destaca que *“Normalmente os desperdícios de energia elétrica são encontrados nos procedimentos*

operacionais existentes, no dimensionamento dos sistemas, na idade dos equipamentos, nas tecnologias não eficientes utilizadas, nas manutenções, nas formas contratuais e no desperdício de água”. Lamentavelmente, o trabalho apresenta uma visão equivocada da realidade, no que se refere aos poços profundos pois, segundo os autores: “Os poços artesianos fornecem água que jorra, sem necessidade de meios de elevação mecânica, sem consumo energético, contudo a perfuração de poços profundos, além do custo elevado, requer equipamento especializado”.

3.2. Estratégias para redução do custo de energia

TSUTIYA (2001) informa que as despesas com energia elétrica representam o segundo ou terceiro item de custo mais importante nas empresas de saneamento brasileiras e, citando HAGUIUDA et al (1996), indica que na SABESP o consumo de energia elétrica em motores representa 90% do total. Esse autor também menciona o fenômeno do artesianismo em poços tubulares, minimiza o assunto e não analisa de forma adequada os respectivos sistemas de bombeamento. O texto faz uma análise abrangente das alternativas existentes para redução do custo de energia elétrica, que são resumidas e agrupadas da seguinte forma:

1. Redução do custo **sem diminuição do consumo de energia**: adequação do sistema tarifário; regularização do contrato de demanda; desativação de instalações sem uso; conferência da medição de consumo; correção do fator de potência; alteração da tensão de alimentação e melhoria do fator de carga;
2. Redução do custo pela **diminuição do consumo de energia**: redução das perdas de carga na tubulação; redução do volume de água bombeada; melhoria do rendimento dos conjuntos motor-bomba;
3. Redução do custo pela alteração do **sistema operacional**: alteração do sistema bombeamento / reservação e utilização de variadores de rotação das bombas;

4. Redução do custo pela **automação** do sistema de abastecimento de água; e
5. Redução do custo com a **geração de energia elétrica**: aproveitamento de potenciais energéticos e uso de geradores em horários de ponta.

O grupo 1 inclui, principalmente, as ações de caráter administrativo cuja implantação pode, em grande parte, ser efetuada sem custos de investimento. As melhorias do sistema tais como, instalação de bancos de capacitores, para correção do fator de potência, e ampliação da capacidade volumétrica de reservação, para otimizar o fator de carga e evitar operação dos motores dos equipamentos de bombeamento em horários de ponta, são em geral necessárias. As ações desse grupo resultam em grandes reduções dos custos com energia elétrica, sem reduzir o consumo de energia, mas com a eliminação de multas por ultrapassagem de demanda e adequação dos planos tarifários.

As ações do grupo 2 também podem resultar em grandes economias de custo operacional de sistemas de bombeamento, atuando na redução do consumo de energia. Segundo TSUTIYA (op. cit.), em alguns sistemas da SABESP foi obtida redução de até 40% do consumo de energia pela redução das perdas de carga da tubulação. A melhoria do rendimento dos conjuntos motor-bomba também pode proporcionar redução significativa do consumo de energia. A otimização do rendimento dos conjuntos de bombeamento utilizados em poços tubulares é analisada em detalhe no item **3.5- Dimensionamento de sistemas de bombeamento para poços tubulares**.

O grupo 3 engloba uma infinidade de soluções possíveis que podem ser alcançadas com estratégias operacionais otimizadas, que em geral incluem a utilização de equipamentos variadores de rotação das bombas, que é analisada em detalhe no item **3.4- Emprego de variadores de rotação em equipamentos de bombeamento**.

O grupo 4 inclui a instalação de automação em sistemas de bombeamento, que reduz sensivelmente os custos operacionais com mão-de-obra, ao mesmo tempo em que minimiza as possibilidades de ocorrência de problemas operacionais causados por falhas humanas. Segundo TSUTIYA (op. cit.), a SABESP obteve redução de custo operacional com a implantação de sistemas de automação de até 25%.

Ações do grupo 5 se referem à geração de energia por sistemas independentes ou como auto-produtor que não fazem parte do escopo do presente trabalho.

3.3. Operação otimizada de sistemas de bombeamento

CLABORN & RAINWATER (1991) apresentam uma metodologia para otimização do custo de energia, em baterias de poços, desde que a capacidade do sistema seja maior que a demanda, mediante um programa computacional que estima a melhor combinação de poços em operação para atender a demanda considerada, com base em dados do aquífero, dos poços, do reservatório e do consumo de energia do sistema.

RIBEIRO (2000) trabalhou com os dados dos poços que abastecem a cidade de Araraquara-SP, efetuou uma análise da composição do custo unitário de produção de água, analisou a influência no custo final de variáveis operacionais, tais como: vazões bombeadas, períodos de operação, demanda de água do sistema e volumes dos reservatórios e testou a aplicação de modelo de simulação baseado na tecnologia denominada “algoritmos genéticos”. A autora sugere a aplicação dessa técnica como subsídio ao processo de decisão no planejamento da expansão do sistema.

REIS et al (2000) relatam que, utilizando a mesma técnica dos “algoritmos genéticos”, concluíram que nos sistemas otimizados, os valores globais dos custos operacionais com energia elétrica dos poços estudados por RIBEIRO (op. cit.) são da mesma ordem de grandeza dos custos de investimentos. Essa conclusão é de grande importância, pois em geral não se faz o cômputo

do custo operacional dos poços quando da sua construção e aponta para a necessidade da otimização energética do bombeamento dos poços.

OUGUI (2003), apresenta o resultado do estudo da operação otimizada de um dos poços utilizados do SAAE – São Carlos (subsistema Cruzeiro do Sul), simulando estratégias de funcionamento das bombas do poço e bombas de recalque em superfície e o importe de água de outro setor. Segundo o autor, a adoção da estratégia ótima de operação das bombas daquele subsistema, determinada por simulação computacional, poderia gerar uma redução do consumo de energia de 40% na ponta e 29% fora da ponta, em relação aos valores realizados no mês de março de 2000.

3.4. Emprego de variadores de rotação em equipamentos de bombeamento

Diversos autores, conforme documentado adiante, destacam que o sistema de acionamento de motores elétricos é um dos aspectos de maior importância do ponto de vista da eficiência energética. Alguns sistemas apresentam desperdício de energia pela elevação do consumo de potência durante o arranque do motor e podem gerar aquecimento excessivo do motor e comprometer sua vida útil.

Entre as diversas formas de acionamento de motores, GRUNDFOS (1996) analisa as seguintes opções de larga aplicação, apresentadas em ordem crescente de sofisticação e inovação tecnológica:

1. **Partida direta:** o motor é ligado diretamente à rede elétrica. Esse método é o que desenvolve menos calor no motor e, conseqüentemente, proporciona maior vida útil, no entanto desenvolve potência extremamente elevada durante a partida, conforme indica a **Figura 1**. Esse método é utilizado apenas para motores com potência de até 45 kW e não permite variar a rotação do motor. Para motores que operam com carga variável, mesmo que sejam de baixa potência, pode ser conveniente utilizar variador de rotação que é apresentado mais adiante no item 5.

Figura 1: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com partida direta, adaptado de GRUNDFOS (1996).

2. **Estrela-triângulo:** é o método mais utilizado para acionamento de bombas centrífugas, por ser simples, seguro e barato. Durante o arranque, a ligação dos pólos do motor é feita em estrela e, após um tempo fixo, automaticamente é feita a comutação para funcionamento em triângulo. Na posição estrela o valor da corrente é reduzido a um terço do valor da partida direta, conforme indicado na **Figura 2**. A aplicação desse sistema de acionamento para bombas submersas com baixo momento de inércia (motor e bombeador leves) não apresenta vantagens significativas. Um fator de desvantagem é a necessidade de utilização de um cabo

adicional de alimentação, que, no caso de poços com diâmetro reduzido, pode representar uma complicação.

Figura 2: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com acionamento tipo estrela-triângulo, adaptado de GRUNDFOS (1996).

3. **Autotransformador:** durante a partida, a tensão é reduzida por meio de autotransformadores (normalmente dois: um para cada fase). Os transformadores freqüentemente possuem duas tensões de saída: uma de 75% e outra de 60%. Na opção de 60% a redução da corrente de arranque é obtida pelo mesmo processo de ligação em estrela. Os equipamentos são mais seguros e mais caros que os anteriores e a

principal vantagem do seu uso é que durante o arranque o pico de corrente é desdobrado em dois, conforme indicado na **Figura 3**.

Figura 3: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com autotransformador, adaptado de GRUNDFOS (1996).

4. **Partida suave:** é obtida com equipamento eletrônico que controla os ângulos de fases e, assim, reduz a tensão e, conseqüentemente, a corrente de arranque para um valor 2 a 3 vezes inferior ao valor de trabalho.

Figura 4: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com partida suave, adaptado de GRUNDFOS (1996).

A potência desenvolvida durante o arranque é suavizada em função da rampa de aumento da tensão, conforme indicado na **Figura 4**, que deve ser curta o suficiente para não provocar superaquecimento do motor.

5. **Inversor (ou conversor) de frequência:** é o método ideal de arranque de motores elétricos, tanto para redução da corrente, que é mantida constante e equivalente à corrente nominal do motor (**Figura 5**), como para eliminação de oscilações bruscas de pressão na saída da bomba. Os inversores de frequência são dispositivos que alteram eletronicamente a

freqüência da corrente elétrica e, conseqüentemente, a rotação dos motores de forma contínua e suave.

Figura 5: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com inversor de freqüência, adaptado de GRUNDFOS (1996).

Segundo PACIFIC GAS AND ELECTRIC COMPANY (1997), os fundamentos teóricos da aplicabilidade do uso de variadores de rotação para redução do consumo de energia são os seguintes:

- a vazão tem uma relação de proporcionalidade direta com a rotação da bomba, ou seja:

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

onde:

Q_1 = vazão na rotação inicial

Q_2 = vazão na nova rotação

N_1 = rotação na condição inicial

N_2 = rotação na nova condição

- a altura manométrica é proporcional à rotação da bomba elevada ao quadrado; ou seja:

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

onde:

H_1 = pressão na rotação inicial

H_2 = pressão na nova rotação

- a potência consumida é proporcional à rotação elevada ao cubo, ou seja:

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

onde:

P_1 = potência na rotação inicial

P_2 = potência na nova rotação

As equações acima podem ser aplicadas para qualquer sistema coerente de unidades de medida e têm a finalidade de demonstrar a importância da aplicação dos inversores de frequência devido à proporcionalidade da potência com as variações de rotação elevadas ao cubo.

No Brasil, devido ao elevado custo dos equipamentos eletrônicos, o acionamento de equipamentos de bombeamento por meio de inversores de frequência tem ainda aplicação restrita apenas às situações em que existem grandes variações de carga durante a operação.

MELLO (1999), realizando estudos em laboratório, concluiu pela viabilidade da aplicação de inversores de frequência no acionamento de equipamentos de bombeamento utilizados em irrigação, principalmente pela redução da potência consumida com variação de carga durante os ciclos de irrigação. AZEVEDO (2003) realizou estudos, em escala piloto, em sistemas reais de irrigação do tipo pivô central, o qual caracteriza uma situação típica de variação recorrente de carga, e obteve redução no consumo de energia de 15,9 a 32,9% com a aplicação de sistemas de acionamento dos motores das bombas com inversores de frequência. TSUTIYA (2001) recomenda que, juntamente com o inversor de frequência, seja instalado um filtro para correção de harmônicos da rede. Além da redução da distorção de harmônicos, a ação do filtro reduz a corrente e corrige o fator de potência. O autor menciona que, em um estudo de caso, o uso de inversor de frequência, em conjunto com filtro de harmônicos, gerou 38% de redução de custo de energia elétrica.

3.5. Dimensionamento de sistemas de bombeamento para poços tubulares

A prática usual de dimensionamento de equipamentos de bombeamento de poços, que consta de textos clássicos internacionais, tais como: CUSTÓDIO & LLAMAS (1976), DRISCOLL (1989), ROSCOE MOSS COMPANY (1990) e nacionais tais como: JORBA & ROCHA (1982), contempla duas etapas:

1. em uma fase preliminar que antecede a construção do poço, são definidas as características de projeto do poço de forma a atender a capacidade de produção desejada, baseado nos dados de demanda do sistema de abastecimento e nas características e potencialidade do aquífero a ser captado; e
2. posteriormente à construção do poço, o dimensionamento é baseado na capacidade real de produção do poço que é determinada por meio de testes de bombeamento. O dimensionamento deve ser revisto a cada

mudança do equipamento de bombeamento, de forma a contemplar as variações das condições operacionais ao longo do tempo.

MACHADO NETO e TSUTIYA (1993) apresentam um roteiro para dimensionamento de sistemas de bombeamento de poços tubulares profundos em sistemas de abastecimento de água, no qual se recomenda a construção da curva de demanda do sistema de bombeamento do poço com base na equação característica do poço, obtida por meio de testes de produção (teste de bombeamento com vazão escalonada).

Conforme ilustra a **Figura 6**, a equação característica do poço é função das perdas de carga, com fluxo laminar e turbulento, definida por Jacob (1947), em KRUSEMAN & RIDER (1990):

$$s = BQ + CQ^2 \dots\dots\dots(4)$$

onde:

s = rebaixamento do nível da água no interior do poço (nível dinâmico – nível estático)

Q = vazão extraída

B = coeficiente de perdas de carga lineares = $B_1 + B_2$

B_1 = coeficiente de perdas lineares do aquífero

B_2 = coeficiente de perdas lineares do poço

C = coeficiente de perdas não lineares do poço

Figura 6: Decomposição das perdas de carga do poço, segundo Jacob (1947), figura adaptada de FEITOSA & MANOEL FILHO (2000).

A equação característica do poço equivale à curva de “altura geométrica”, à qual são somadas as perdas de carga na tubulação edutora¹ desde o ponto

¹ O termo “tubulação edutora” é derivado do inglês “eductor pipe” e se refere à tubulação instalada no interior dos poços, pela qual é feita a elevação da água até a superfície.

de entrada da água na bomba até o ponto de descarga da água na superfície, resultando na curva indicada como “altura manométrica” (**Figura 7**).

Figura 7: Gráfico esquemático das curvas de demanda do sistema (poço) e curvas de performance da bomba (adaptado de LÜDECKE & BOLDT, 2004).

Numa etapa posterior, é feita a seleção da bomba, assegurando que o seu ponto de funcionamento (cruzamento da curva de performance da bomba, com a curva manométrica do poço) corresponda ao melhor rendimento do equipamento que será utilizado, conforme indicado na **Figura 7**.

Segundo dados de catálogos dos fabricantes (no Brasil: Bombas Leão, Bombas Ebara, KSB Bombas, Bombas Mark-Grundfos), esses equipamentos

apresentam rendimentos de 75 a 85%. No entanto, os rendimentos reais dos equipamentos em operação nos poços estão via de regra muito abaixo dessa faixa. LÜDECKE & BOLDT (2004) informam que a KSB (sem esclarecer se na Europa toda) analisou, desde 1980, a eficiência de mais de 2.500 bombas de poços e verificou que 37% delas apresentaram rendimento inferior a 40%.

3.6. Métodos para avaliação de poços e respectivos equipamentos de bombeamento

O “Manual de operação e manutenção de poços” de autoria de JORBA & ROCHA (1982), lançado inicialmente em 1980, pelo DAEE, representou um marco ainda não superado para orientação prática e estabelecimento dos critérios para avaliação de poços e seus sistemas de bombeamento. Segundo o manual, os dados básicos dos poços que são necessários em um programa de operação controlada são: relatório da construção do poço, resultados das análises e exames laboratoriais da água e características dos equipamentos de bombeamento e instalações auxiliares. Para o estabelecimento das condições iniciais de operação, o manual recomenda: a execução de testes de produção do poço (determinação das perdas de carga e da eficiência) e a instalação de dispositivos de medição de: vazão, nível da água no interior do poço, manômetro, medidor de areia, pH, condutividade elétrica e temperatura. As **Tabelas 1 e 2** reproduzem os sumários dos dados do poço e do conjunto de bombeamento, respectivamente, e a frequência com que são recomendados para serem monitorados durante a operação.

Tabela 1: Sumário dos dados do poço a serem monitorados durante a operação, reproduzido de JORBA & ROCHA (1982)

medições e atividades	frequência			
	diária	mensal	semestral	anual
vazão	x			
nível inicial	x			
nível estático		x		
nível dinâmico	x			
volume total extraído	x			
tempo de operação	x			
teste de bombeamento		x		
teste de produção				x
análise físico-química			x	x
análise bacteriológica				x
teor de areia				x
processamento de dados		x		
interpretação			x	
recomendações a manutenção		sempre que necessário		

Tabela 2: Sumário dos dados do conjunto de bombeamento a serem monitorados durante a operação, reproduzido de JORBA & ROCHA (1982)

inspeções e atividades	frequência			
	diária	mensal	semestral	anual
tempo de funcionamento do conjunto	x			
volume extraído	x			
consumo de energia ou combustível	x			
condições de trabalho do conjunto	x			
inspeção e serviços		x	x	x
interpretação de dados		x		x
avaliação de desempenho do sistema				x

JORBA & ROCHA (1982) recomendam que a análise dos dados seja feita por meio de gráficos do tipo “hidrógrafas”, em séries temporais, de forma a permitir a identificação de tendências de evolução dos parâmetros monitorados. A vazão específica do poço (vazão por metro de rebaixamento)

é considerada como o parâmetro mais útil para análise da evolução da performance do poço e como indicador da necessidade de operações de manutenção.

ROSCOE MOSS COMPANY (1990) apresenta recomendações para programas de monitoramento da operação e de manutenção de poços e sistemas de bombeamento que incluem o cálculo sistemático da potência requerida, da potência consumida e da eficiência (coeficiente entre os dois valores de potência requerida / consumida). Adaptando-se as fórmulas propostas para unidades métricas resultam nas seguintes equações:

Equações para cálculo da potência consumida:

$$P_h = \rho \times g \times H_{man} \times Q \dots\dots\dots(5)$$

onde:

P_m = potência hidráulica

ρ = massa específica da água

g = aceleração da gravidade

H_{man} = altura manométrica

Q = vazão

$$P_m = P_e \times \eta_m \times \cos \phi \dots\dots\dots(6)$$

onde:

P_m = potência mecânica

η_m = rendimento mecânico

V = tensão elétrica

$$P_e = V \times I \times \sqrt{3} \dots\dots\dots(7)$$

onde:

P_e = potência elétrica

I = corrente elétrica

V = tensão elétrica

Combinando-se as equações (5), (6) e (7), obtém-se as equações para cálculo da potencia requerida e consumida, conforme segue:

Equação para cálculo da potência requerida:

$$P_r = \frac{\rho \times g \times Q \times AMT}{\eta} \dots\dots\dots(8)$$

onde:

P_r = potência requerida (kW)

Q = vazão (m³/s)

AMT = altura manométrica total (m)

η = rendimento do sistema de bombeamento

ρ = massa específica da água (kg/m³)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

para cálculo da potência consumida a partir das medidas de tensão e corrente:

$$P_{C1} = \sqrt{3} \times I \times V \times \cos \phi \dots\dots\dots(9)$$

onde:

P_{C1} = potência consumida (kW)

I = corrente elétrica (A)

V = tensão elétrica (V)

$\cos \phi$ = fator de potência

4. METODOLOGIA

4.1. Seleção da área de estudo e coleta de dados

A cidade de São Carlos foi selecionada, para o estudo de caso, pois parte da água utilizada no sistema público de abastecimento é proveniente de poços tubulares profundos, cujos programas de monitoramento e manutenção geram registros de dados operacionais dos poços e sistemas de bombeamento que são a base para o presente trabalho.

A área de estudo engloba a cidade de São Carlos e arredores e equivale a uma quadrícula com 12 km na direção EO e 15 km na direção NS, delimitada pelas coordenadas 7555 e 7570 km N e 196 e 208 km E.

Em função dos objetivos estabelecidos, o presente trabalho se limitou à coleta e análise dos dados dos poços do SAAE, com exceção feita às vazões outorgadas pelo DAAE, as quais foram coletadas e analisadas para todos os poços da área de estudo. Os dados dos poços a serem coletados e analisados são:

- Características construtivas dos poços;
- Especificações e características dos equipamentos de bombeamento;
- Registros de operações de manutenção;
- Consumo de energia elétrica nos equipamentos de bombeamento dos poços; e
- Medidas de nível estático, nível dinâmico e vazão.

Os dados coletados foram obtidos em relatórios impressos e arquivos do tipo planilha eletrônica gravados em disquetes de 3 1/2" e informações verbais do pessoal responsável pela operação e manutenção dos poços. Não foram utilizados dados do sistema de automação pois os dados operacionais dos

poços nesse sistema são bastante restritos e limitados ao período de um exercício financeiro, já que a cada final de período, após a gravação do *back-up* os bancos de dados são reinicializados. Segundo informações do pessoal do setor responsável pelo sistema de automação, devido a alterações constantes de programação do sistema, a recuperação dos *back-up's* de um ano para outro se torna praticamente impossível e assim nunca existirão dados comparativos.

4.2. Avaliação hidrogeológica

A avaliação hidrogeológica da área será efetuada buscando caracterizar o(s) aquífero(s) presente(s), tipos e condições de funcionamento e de fluxo da água, as relações hidráulicas entre eles, os parâmetros hidrodinâmicos, balanço hídrico com quantificação da recarga, descarga, volumes explorados e disponibilidade de água, etc. de forma a embasar o trabalho e contextualizar a avaliação dos poços e respectivos sistemas de bombeamento.

A quantificação do uso de água subterrânea na cidade de São Carlos, será feita com base em um levantamento, junto ao DAEE – Escritório de Araraquara, dos poços públicos e particulares com concessão de direito de uso ou com processo de regularização ainda em tramitação. Os cálculos dos volumes extraídos utilizam os dados informados de vazão e período diário de funcionamento. Para os casos em que o período diário de funcionamento não é informado será adotado período de 20h/dia e em todos os poços será considerado funcionamento durante 30 dias/mês.

4.3. Avaliação da evolução da performance dos poços e equipamentos de bombeamento

A avaliação da evolução da performance dos poços do SAAE de São Carlos será baseada nas medidas mensais de nível estático, nível dinâmico e vazão instantânea, no período de 12/1991 a 02/2004 efetuadas por empresas contratadas para execução de serviços de manutenção, conforme indicado na

Tabela 1. Os dados originais de nível da água e vazão que constam dos relatórios de construção dos poços elaborados pelas respectivas empresas perfuradoras, complementados, quando necessário, com dados do cadastro de poços do DAEE em Araraquara, serão adotados como referência.

Tabela 3: Empresas responsáveis pelos relatórios dos serviços de manutenção dos poços do SAAE

empresa	Período	
	início	Fim
CONTEP	12/1991	02/1995
HIDROGESP	07/1995	06/1996
CONTEP	02/1997	01/1998
UNIPER	06/1998	02/2004

Os serviços de manutenção dos poços, que vêm sendo contratados anualmente pelo SAAE desde 1991, geram relatórios mensais que incluem medições de nível da água, vazão instantânea, tensão e corrente da alimentação elétrica. No período de 12/1991 a 02/1995, as medições foram feitas com frequência semanal e, desde então, passaram a ser feitas mensalmente.

Em geral, os primeiros relatórios não apresentavam dados de nível da água, pois as condições de instalação dos poços não permitiam a realização das medidas. Durante as substituições de bombas, as instalações dos poços foram sendo readequadas, permitindo a medição do nível da água.

A partir dos dados dos relatórios de construção e de manutenção dos poços foram construídas séries históricas de nível da água e vazão dos poços, em planilha eletrônica e elaborados gráficos do tipo “hidrógrafas” para avaliação do comportamento temporal da performance dos poços. Para permitir a visualização da tendência de evolução do nível da água (estático e dinâmico) foram traçadas as curvas de ajuste por regressão linear. Com base nas equações de regressão linear foram estimados os níveis estático e dinâmico de todos os poços para a data de dezembro de 2003.

Os relatórios de manutenção também foram utilizados como fonte de informações e dados históricos de serviços de manutenção e reparo das bombas dos poços e das características, especificações e condições de instalação dos equipamentos de bombeamento e dos sistemas de acionamento elétrico.

4.4. Avaliação do consumo de energia elétrica

No presente trabalho, será analisada e quantificada a possibilidade de reduzir o consumo de eletricidade pela **melhoria do rendimento** dos sistemas de bombeamento dos poços. O termo equivalente na língua inglesa para definir a capacidade do equipamento de transformar energia em trabalho é *energy efficiency*.

A avaliação do rendimento dos sistemas de bombeamento será feita com base em dados disponíveis de medidas de: vazão, pressão e consumo de energia. A equação para cálculo do rendimento do sistema de bombeamento a partir da potência consumida será baseada na **Equação 10**, apresentada anteriormente, modificada da seguinte forma:

$$\eta = \frac{9,8 \times Q \times AMT}{P_c \times 3600} \dots\dots\dots(10)$$

onde:

η = rendimento do sistema de bombeamento

P_c = potência consumida (kW)

Q = vazão (m³/h)

AMT = altura manométrica total (m)

O valor de rendimento calculado dessa forma não pode ser interpretado como se fosse o rendimento do equipamento de bombeamento, pois equivale ao rendimento hidráulico-eleto-mecânico, real e global que seria resultante do produto dos rendimentos: da bomba, do motor, da transmissão mecânica, da

transmissão elétrica (cabos de alimentação) e do sistema de acionamento. O cálculo do rendimento do sistema de bombeamento será efetuado por dois métodos e serão denominados η_1 e η_2 .

4.4.1. Cálculo da altura manométrica

Para o caso dos poços de São Carlos, como não existem dados de medida de pressão, o valor da AMT será calculado somando-se as alturas dos reservatórios de descarga dos poços e as perdas de carga na tubulação desde a “cabeça” do poço até a saída no reservatório. Para esse fim foram coletados dados de altura dos reservatórios alimentados diretamente por cada poço, comprimento e diâmetro das sub-adutoras.

Devido à falta de informações detalhadas e para facilitar os cálculos, na tubulação edutora foi considerado, como padrão para todos os poços, um cotovelo de raio longo e uma válvula de retenção², e na interligação poço - reservatório, foi adotado como padrão também para todos os poços, 4 cotovelos de raio longo, um registro de gaveta e uma saída de tubulação no interior do reservatório de descarga ou de distribuição, conforme indicado na **Figura 8**. As perdas localizadas foram estimadas sob a forma de comprimento equivalente, calculado com base no diâmetro interno, segundo as seguintes equações apresentadas por Porto (1999):

- cotovelo 90º raio longo: $Le = 0,068 + 20,96 D$
- registro de gaveta aberto: $Le = 0,01 + 6,89 D$
- saída de tubulação: $Le = -0,05 + 30,98 D$

² No presente trabalho, buscou-se uniformizar as condições de análise dos rendimentos das bombas submersas e as de eixo prolongado. As perdas de carga por atrito adicionais, causadas por mancais e eixos, nas bombas de eixo prolongado, são computadas como parte do rendimento eletromecânico do equipamento.

Figura 8: Esquema ilustrativo dos componentes da altura manométrica total (AMT)

O cálculo das perdas de carga por atrito na tubulação edutora e na tubulação de interligação do poço ao reservatório é feito com base nas **equações (11) e (12)**. A solução da **Equação (11)** foi obtida por meio da ferramenta *solver* do Excel da Microsoft e posteriormente aplicada na **Equação (12)**.

Fórmula implícita de Colebrook-White para o escoamento uniforme turbulento em tubulações (PORTO, 1999):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{R_e \sqrt{f}} \right) \dots \dots \dots (11)$$

onde: f : fator de atrito

ε : rugosidade absoluta (m)

D : diâmetro da tubulação (m)

R_e : número de Reynolds (adimensional)

O valor de ε (rugosidade absoluta) foi assumido como sendo igual em todos os poços a 0,0002 m, que equivale ao valor usualmente adotado para tubos de aço galvanizado.

Fórmula universal (Darcy-Weisbach) para cálculo das perdas de carga distribuídas em tubulações:

$$\Delta h = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(12)$$

onde: Δh : perda de carga (m)

f : fator de atrito, calculado pela equação (11)

L : comprimento da tubulação (m)

D : diâmetro da tubulação (m)

v : velocidade do fluxo (m/s)

g : aceleração da gravidade (m²/s)

4.4.2. Cálculo do rendimento η_I

No cálculo do rendimento η_I será empregado o valor da potência consumida calculado segundo a **Equação (10)**, com base nos valores médios de tensão entre as 3 fases (RS, RT, e ST) e da corrente das fases (R, S e T). Para o fator de potência dos motores ($\cos \varphi$) será adotado um valor único de 0,87. O valor da vazão (Q) será o valor médio medido mensalmente durante o ano de 2003. O valor da altura manométrica total (AMT) representa a soma das alturas manométricas abaixo e acima da superfície. O valor da altura manométrica abaixo da superfície foi

calculado com base no valor médio da profundidade do nível dinâmico medido mensalmente durante o ano de 2003 somado às perdas de carga por atrito na tubulação edutora. O valor da altura manométrica acima da superfície pode ser obtido de duas maneiras:

1. medido como pressão no interior da tubulação de descarga através de manômetro instalado logo na “cabeça” do poço; ou
2. calculado pela soma do desnível geométrico do ponto de descarga acima da superfície com as perdas de carga na tubulação que interliga o poço ao reservatório de descarga.

4.4.3. Cálculo do rendimento η_2

No cálculo do rendimento η_2 será empregado o valor da potência consumida, calculado a partir do consumo de energia elétrica registrado nas contas mensais, utilizando-se o valor médio do ano de 2003. Tendo em vista que, em alguns subsistemas, um único medidor de consumo de energia é utilizado em conjunto pelo equipamento de bombeamento do poço e pela(s) bomba(s) de recalque em superfície, foram estimadas as parcelas do consumo total que seriam devidas somente às bombas dos poços, com base na proporcionalidade das potências nominais e estimativas de tempo de funcionamento das bombas de recalque, resultando em porcentagens de consumo, para a bomba do poço. Portanto, nesses casos (em que existe mais de uma bomba conectada na mesma unidade de consumo de energia elétrica), o valor obtido de η_2 deverá ser menos preciso. A metodologia de cálculo será a seguinte:

Sendo:

PNP : potência nominal da bomba do poço (cv);

PNR : somatória das potências nominais das bombas de recalque em superfície (cv);

PTF : fração do tempo total de funcionamento da bomba do poço em que as bombas de recalque funcionam

A parcela de consumo total de energia (CT) relativa à bomba do poço (CP) será dada por:

$$CP = CT \times \frac{PNP}{PNP + (PTF \times PNR)} \dots\dots\dots(13)$$

Na aplicação da **Equação (10)** para o cálculo do rendimento η_2 , será utilizado o valor médio mensal do ano de 2003 do volume bombeado de água, constante dos relatórios gerenciais de produção de água. O valor da altura manométrica total (AMT) será o mesmo utilizado no cálculo de η_1 .

A defasagem existente entre os períodos de medição do consumo de energia elétrica e de medição do volume de água bombeada pode influir negativamente na qualidade dos resultados dos cálculos dos valores de rendimento η_2 . No entanto, adotando-se a média dos valores mensais procura-se minimizar o efeito da defasagem dos períodos de medição.

4.5. Elaboração de propostas para otimização do sistema e redução do custo operacional

Com base nas recomendações gerais de TSUTIYA (2001), serão elaboradas propostas gerais para redução do custo operacional dos poços e de otimização do consumo de energia do sistema.

A partir do cálculo dos rendimentos globais reais dos sistemas de bombeamento será estimado o potencial de redução do consumo de energia mediante a otimização do sistema com a aplicação de equipamentos de alto rendimento e sistema de acionamento com inversores de frequência.

5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A cidade de São Carlos – SP, está localizada no planalto central do Estado de São Paulo, nas coordenadas geográficas 22° 21' S e 47° 54' W, altitude de 885 m. Segundo IPT (2004), a cidade de São Carlos faz parte dos 451 km² (39,4 %) do município que se encontram inseridos na Bacia do Alto Rio Jacaré-Guaçu, com área de 12.000 km² e que corresponde à Unidade de Gestão de Recursos Hídricos – UGRHI, número 13 e Comitê da Bacia Hidrográfica Tietê / Jacaré – CBH-TJ. O clima é temperado de altitude (Cwb Koeppen), com média das máximas de 28° C, média das mínimas de 12° C, média compensada de 20° C, umidade relativa no verão de 76% e inverno de 54%. A pluviosidade média anual varia de 1550 a 1700 mm.

A área urbana da sede municipal está contida num perímetro de contorno aproximadamente elíptico, com eixo maior medindo 14 km na direção NS e eixo menor medindo cerca de 10 km na direção EO, abrangendo, cerca de 95 km², com uma população estimada de 200.000 habitantes.

O abastecimento público de água da cidade é feito pelo SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgotos, autarquia municipal, a qual possui 422 funcionários. A parcela majoritária da água utilizada no abastecimento (53%) é de origem superficial, captada em dois cursos de água, providos de barragens, conforme dados da **Tabela 4**.

Tabela 4: Dados gerais das captações superficiais

captação	área de drenagem (km ²)	distância da ETA (km)	desnível (m)	adutora	elevatória
Ribeirão do Feijão	233	17	165	600 mm de aço carbono	4 bombas 400 cv
Espraiado (Córrego Monjolinho)	25	4,1	0	400 mm de FoFo	3 bombas 100 cv

Fonte: Serec (1989)

Na **Tabela 5** são apresentados alguns dados gerais do sistema de abastecimento de água e coleta de esgoto. Para permitir uma visualização da evolução do sistema de saneamento ambiental da cidade de São Carlos, nas duas últimas décadas, foram incluídos os dados relativos ao ano de 1989, segundo SEREC (1989). Os dados indicam que, na última década, dobrou o número de poços de 10 para 20 e o volume de água subterrânea captado que passou de 518 para 1.036 mil m³/mês.

Tabela 5: Dados gerais do sistema de saneamento ambiental da cidade de São Carlos

parâmetro			unidade	1989	2004	crescimento
população			un	152.000	200.000	32%
funcionários			un	?	422	?
abastecimento de água	volume produzido	unitário	L/dia/hab	401	375	-6%
		superficial	1000 m ³ /mês	1.309	1.212	-7%
		subterrânea	1000 m ³ /mês	518	1.036	100%
		total	1000 m ³ /mês	1.827	2.248	23%
	adutoras		km	17	21	24%
	poços		un	10	20	100%
	ETA		un	1	2	100%
	reservatórios	elevados	un	12	22	83%
		apoiados	un	9	17	89%
		volume	m ³	16.785	26.350	57%
	rede distribuição		km	390	655	68%
	ligações	residencial	un	34.786	58.492	68%
		comercial	un	1.704	7.410	335%
		industrial	un	146	322	121%
		outras	un	346	92	-73%
		total	un	36.982	66.316	79%
esgoto	rede coletora		km	?	647	?
	ligações		un	?	65.826	?
	emissário		km	?	1.700	?
	ETE		un	-	-	0%

5.1.1. Evolução da demanda de água

Os dados mensais de produção de água para abastecimento público da cidade de São Carlos, no período de 1994 a Abril/2004 são apresentados na **Figura 9**, onde se verifica que, até meados de 1998, houve um acentuado crescimento do volume total produzido, obtido exclusivamente pelo aumento da produção de água subterrânea. Nos dois anos que se seguiram, os volumes produzidos mantiveram-se estáveis tanto para água superficial como para a subterrânea. Em 2001, devido ao racionamento motivado pela crise de energia, houve uma significativa redução do volume produzido, principalmente o de água superficial e, desde então, os volumes vêm sendo aumentados continuamente. Na maior parte do tempo, a participação volumétrica da água subterrânea é ligeiramente inferior a da água superficial (47% do total), sendo que de 1997 a 1999 representou praticamente 50%.

O valor médio, ao longo de dez anos, da taxa de crescimento da produção total de água é de 380 mil m³ por ano, que equivale à necessidade de ampliar o sistema para produzir mais 45 m³/h a cada ano. Se este crescimento da demanda passar a ser atendido exclusivamente com aumento da produção de água subterrânea irá exigir a construção, a cada dois anos, de um novo poço com capacidade de produção da ordem de 100 m³/h.

O acentuado crescimento da produção de água subterrânea que vem sendo observado nas últimas décadas e a tendência de crescimento da sua participação no volume total de água utilizado para o abastecimento público da cidade apontam para a necessidade de uma maior preocupação relativa ao planejamento das condições de exploração desse recurso.

Figura 9: Gráfico com dados fornecidos pelo SAAE de produção mensal de água superficial e subterrânea, no período de 1994-2004, para abastecimento da cidade de São Carlos