

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

Orientador: Prof. Dr. Edson C. Wendland

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

(folha de aprovação)

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 as contribuições e sugestões do Prof. Dr. Rodrigo de Mello Porto do Departamento de Hidráulica e Saneamento - EESC / USP.

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	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	3
2. OBJETIVOS	9
2.1. Objetivo geral	9
2.2. Objetivos específicos	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1. Eficiência energética em sistemas de saneamento.....	13
3.2. Estratégias para redução do custo de energia	14
3.3. Operação otimizada de sistemas de bombeamento	16
3.4. Emprego de variadores de rotação em equipamentos de bombeamento	17
3.5. Dimensionamento de sistemas de bombeamento para poços tubulares..	24
3.6. Métodos para avaliação de poços e respectivos equipamentos de bombeamento	28
4. METODOLOGIA	35
4.1. Seleção da área de estudo e coleta de dados	35
4.2. Avaliação hidrogeológica	36
4.3. Avaliação da evolução da performance dos poços e equipamentos de bombeamento	36
4.4. Avaliação do consumo de energia elétrica	38
4.4.1. Cálculo do rendimento η_1	39
4.4.2. Cálculo da altura manométrica	39
4.4.3. Cálculo do rendimento η_2	42

4.5. Elaboração de propostas para otimização do sistema e redução do custo operacional.....	44
5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47
5.1.1. Evolução da demanda de água	49
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
6.1. Avaliação hidrogeológica.....	53
6.1.1. Feições geológicas da área	53
6.1.2. Caracterização dos aquíferos	56
6.1.3. Dados gerais dos poços do SAAE	58
6.1.4. Análise da exploração atual dos aquíferos na área	62
6.1.5. Balanço entre a disponibilidade e o consumo de água subterrânea na área	68
6.1.6. Análise da evolução do comportamento do aquífero	70
6.1.7. Hidroquímica e qualidade da água	75
6.2. Análise da performance dos poços	77
6.3. Análise dos sistemas de bombeamento dos poços	110
6.3.1. Características dos sistemas de bombeamento	110
6.3.2. Avaliação do rendimento dos sistemas de bombeamento	114
6.3.3. Despesas com energia elétrica nos sistemas de bombeamento	119
6.4. Soluções para otimização do sistema.....	121
6.4.1. Utilização de equipamentos de bombeamento de alto rendimento... ..	121
6.4.2. Redimensionamento dos sistemas de bombeamento.....	124
6.4.3. Modernização dos sistemas de acionamento e automação.....	127
6.4.4. Medidas complementares para reduzir o custo de energia elétrica	129
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139

LISTA DE FIGURAS

número	página
Figura 1: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com partida direta, adaptado de GRUNDFOS (1996).	18
Figura 2: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com acionamento tipo estrela-triângulo, adaptado de GRUNDFOS (1996).....	19
Figura 3: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com autotransformador, adaptado de GRUNDFOS (1996)...	20
Figura 4: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com partida suave, adaptado de GRUNDFOS (1996).....	21
Figura 5: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com inversor de frequência, adaptado de GRUNDFOS (1996).	22
Figura 6: Decomposição das perdas de carga do poço, segundo Jacob (1947), figura adaptada de FEITOSA & MANOEL FILHO (2000).	26
Figura 7: Gráfico esquemático das curvas de demanda do sistema (poço) e curvas de performance da bomba (adaptado de LÜDECKE & BOLDT, 2004).....	27
Figura 8: Sumário dos dados do poço a serem monitorados durante a operação, reproduzido de JORBA & ROCHA (1982)	29
Figura 9: Sumário dos dados do conjunto de bombeamento a serem monitorados durante a operação, reproduzido de JORBA & ROCHA (1982).....	30
Figura 10: Esquema ilustrativo dos componentes da altura manométrica total (AMT)	41
Figura 11: 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.....	50
Figura 12: Mapa geológico simplificado da área da cidade de São Carlos (adaptado de Aguiar, 1989).....	56

Figura 13: 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.	61
Figura 14: Planta com gráficos das vazões outorgadas de poços públicos e particulares da cidade de São Carlos	68
Figura 15: Gráfico da evolução do nível piezométrico dos poços do SAAE, nos últimos 20 anos	71
Figura 16: Mapa hidrogeológico com superfície piezométrica e direções de fluxo e gráficos de produção mensal dos poços do SAAE do Aquífero Guarani em 2003.....	73
Figura 17: 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.	74
Figura 18: Gráfico de evolução da performance do poço nº 02 – Antonio Fisher dos Santos	78
Figura 19: Gráfico de evolução da performance do poço nº 05 – Distrito Industrial	80
Figura 20: Gráfico de evolução da performance do poço nº 08 - Samambaia....	82
Figura 21: Gráfico de evolução da performance do poço nº 09 – Maria Stella Fagá	84
Figura 22: Gráfico de evolução da performance do poço nº 11 – Azulville II	86
Figura 23: Gráfico de evolução da performance do poço nº 12 – São Carlos III	88
Figura 24: Gráfico de evolução da performance do poço nº 14 – Parque Faber	90
Figura 25: Gráfico de evolução da performance do poço nº 15 – Santa Felícia .	92
Figura 26: Gráfico de evolução da performance do poço nº 16 – Boa Vista.....	94
Figura 27: Gráfico de evolução da performance do poço nº 17 – Cidade Aracy.	96
Figura 28: Gráfico de evolução da performance do poço nº 18 – Santa Eudóxia	98
Figura 29: Gráfico de evolução da performance do poço nº 19 - Tramer	100
Figura 30: Gráfico de evolução da performance do poço nº 20 – Vila Nery.....	102
Figura 31: Gráfico de evolução da performance do poço nº 21 – Cruzeiro do Sul	104
Figura 32: Gráfico de evolução da performance do poço nº 22 – Parque Fehr	106

Figura 33: Gráfico de evolução da performance do poço nº 23 - Jockey Club II	108
Figura 34: Comparação entre os valores (η_1) e (η_2) do rendimento eletromecânico dos sistemas de bombeamento dos poços	118
Figura 35: Desenho esquemático de sistema de recalque com bomba em linha e bomba submersa com central de controle de motores e inversores de frequência.	127

LISTA DE TABELAS

número	página
Tabela 1: Empresas responsáveis pelos relatórios dos serviços de manutenção dos poços do SAAE	37
Tabela 2: Dados gerais das captações superficiais	47
Tabela 3: Dados gerais do sistema de saneamento ambiental da cidade de São Carlos	48
Tabela 4: Parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Guarani, determinados nos poços do SAAE de São Carlos	58
Tabela 5: Dados gerais dos poços tubulares do SAAE	60
Tabela 6: Outorgas de direito de uso da água dos poços do SAAE	63
Tabela 7: Poços com outorga de direito de uso da água – Aquífero Bauru	64
Tabela 8: Poços com outorga de direito de uso da água – Aquífero Serra Geral	65
Tabela 9: Poços com outorga de direito de uso da água – Aquífero Guarani	65
Tabela 10: Nível piezométrico dos poços do SAAE em dezembro de 2003	70
Tabela 11: Resultados de análises químicas de água subterrânea em poços da cidade de São Carlos	76
Tabela 12: Resumo da avaliação das séries históricas de dados dos poços.	109
Tabela 13: Equipamentos de bombeamento dos poços do SAAE	111
Tabela 14: Resumo da potência por fabricante das bombas dos poços do SAAE	112
Tabela 15: Condições de instalação das bombas dos poços	113
Tabela 16: 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	115
Tabela 17: Valores médios calculados de energia consumida e de produção mensal de água do ano de 2003	116
Tabela 18: Valores de rendimento eletromecânico calculados com base nos dados da Tabela 16 (η_1) e Tabela 17 (η_2)	117
Tabela 19: Despesas de energia elétrica dos sistemas de bombeamento dos poços	120

Tabela 20: Projeção da redução do consumo de energia elétrica com 65% de rendimento em todos os sistemas de bombeamento dos poços	122
Tabela 21: estimativa da redução das despesas com energia elétrica em 5 anos, com taxa anual de juros de 15%	123

RESUMO

PERRONI, J.C.A. (2003). ***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 majoritariamente 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. (2003). *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

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, 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 o 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 artesanais 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 artesanismo 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 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 **1.5- Dimensionamento e 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 **1.4- Emprego de variadores de rotação em equipamentos de bombeamento**.

O grupo 4 inclui a instalação de automação, 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%.

A ações do grupo 5 se referem à co-geração de energia que não faz 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 compute 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.

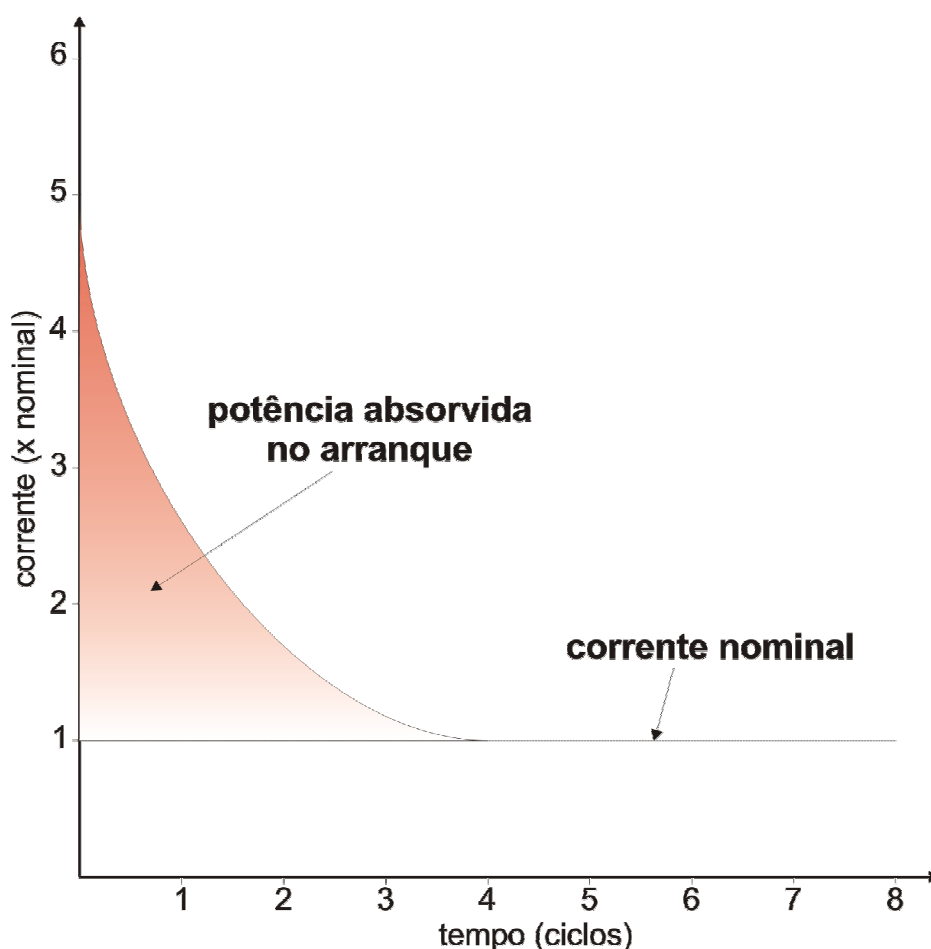


Figura 1: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com partida direta, adaptado de GRUNDFOS (1996).

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.

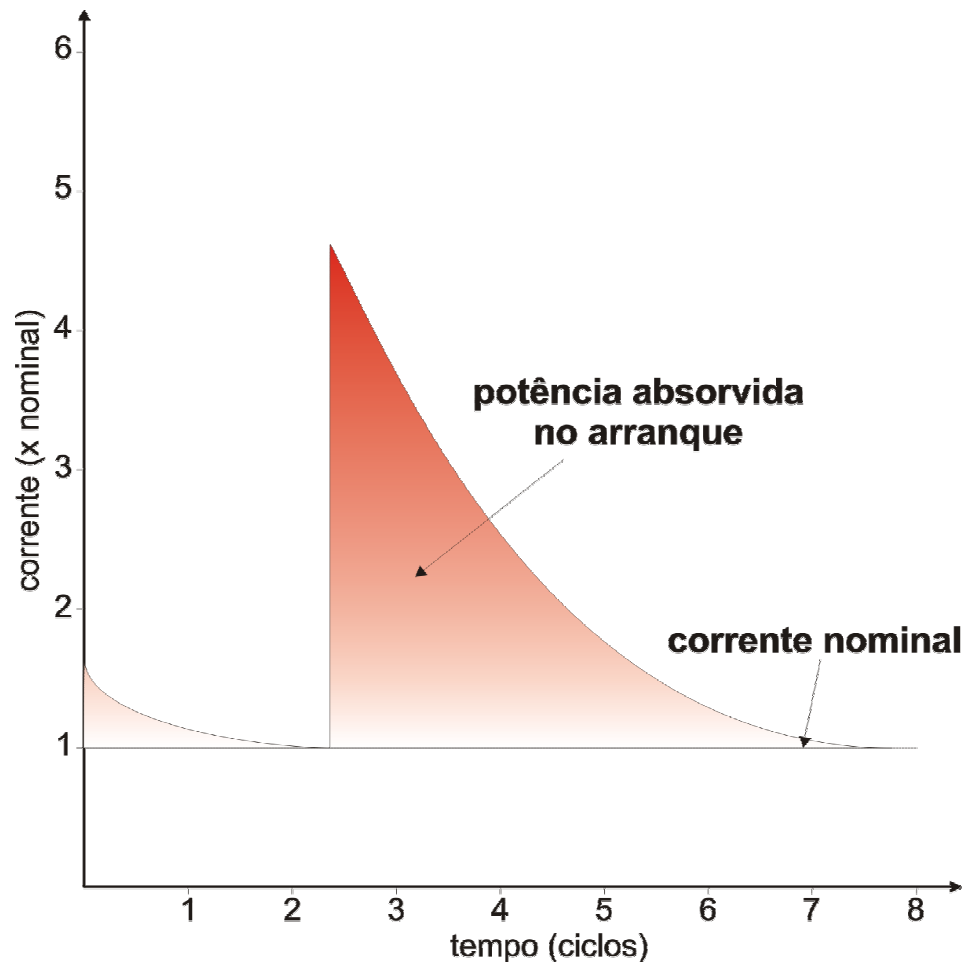


Figura 2: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com acionamento tipo estrela-triângulo, adaptado de GRUNDFOS (1996).

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**.

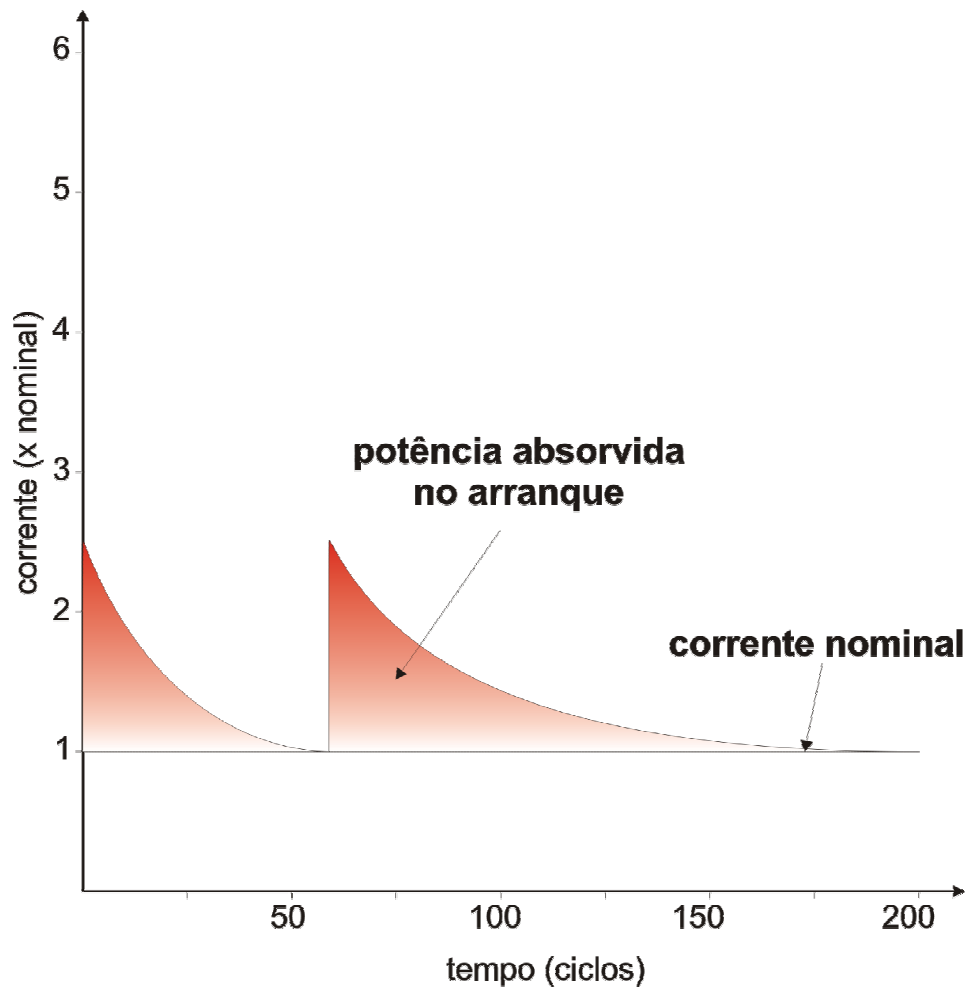


Figura 3: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com autotransformador, adaptado de GRUNDFOS (1996).

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.

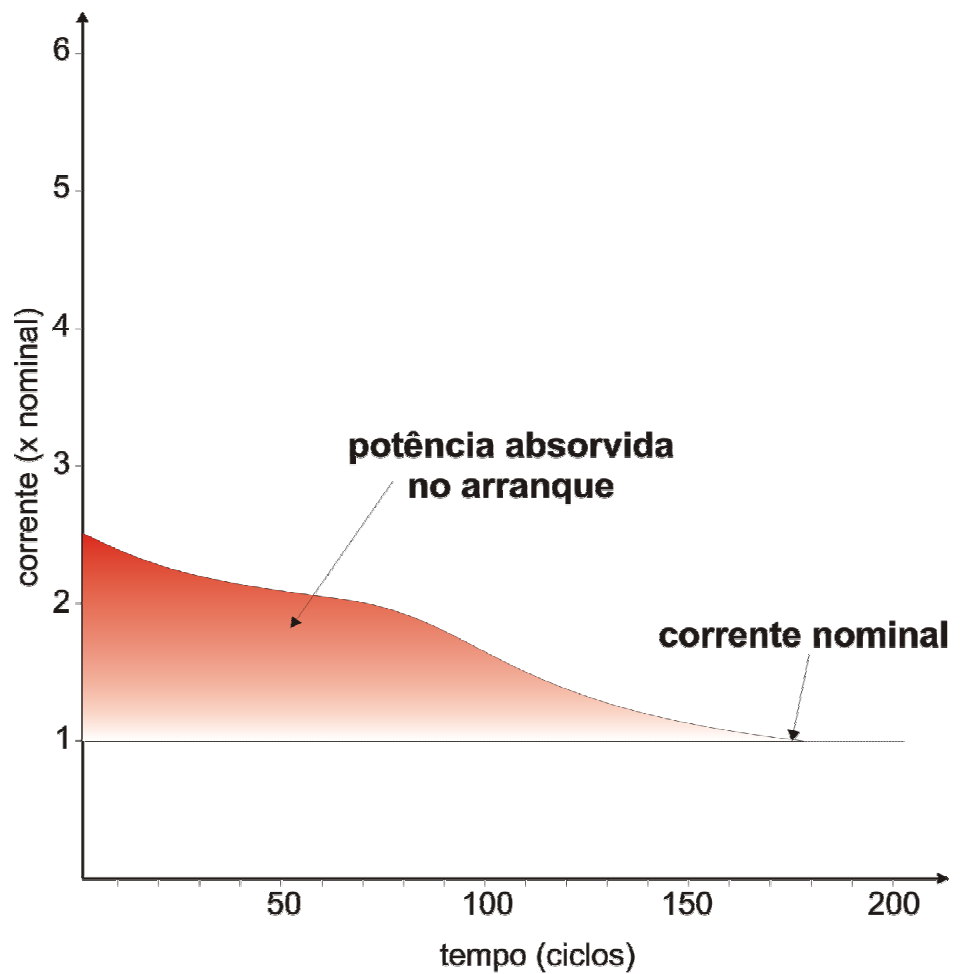


Figura 4: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com partida suave, adaptado de GRUNDFOS (1996).

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.

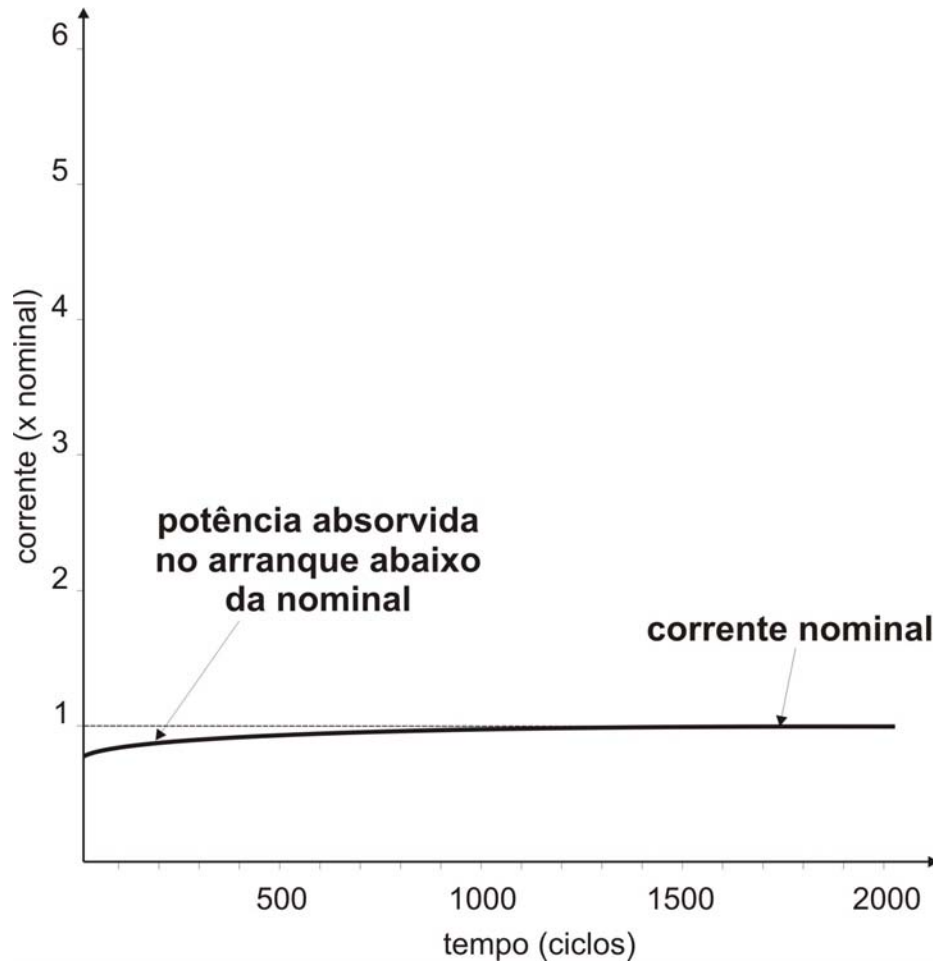


Figura 5: Gráfico esquemático da potência consumida durante o arranque de motor elétrico com inversor de freqüência, adaptado de GRUNDFOS (1996).

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 velocidade inicial

Q_2 = vazão na nova velocidade

N_1 = velocidade na condição inicial

N_2 = velocidade 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 velocidade inicial

H_2 = pressão na nova velocidade

- 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 velocidade inicial

P_2 = potência na nova velocidade

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), é:

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

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

$$B_{(r_{ew,t})} = B_{1(rw,t)} + B_2$$

$B_{1(rw,t)}$ = coeficiente de perdas lineares do aquífero

B_2 = coeficiente de perdas lineares do poço

C = coeficiente de perdas não lineares do poço

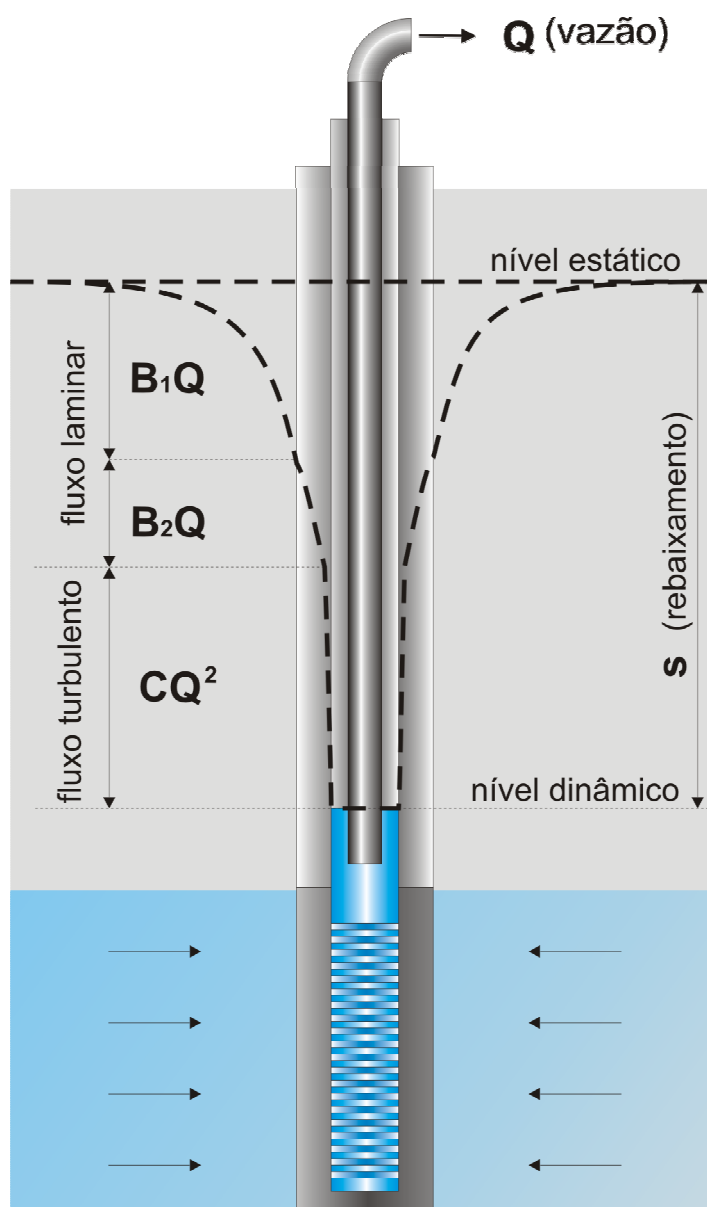


Figura 6: Decomposição das perdas de carga do poço, segundo Jacob (1947), figura adaptada de FEITOSA & MANOEL FILHO (2000).

A equação característica do poço equivale à curva de “altura geométrica”, na qual são somadas as perdas de carga na tubulação edutora¹ desde o ponto de entrada da água na bomba até o ponto de descarga da água em

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.

superfície, resultando na curva indicada como “altura manométrica” (Figura 7).

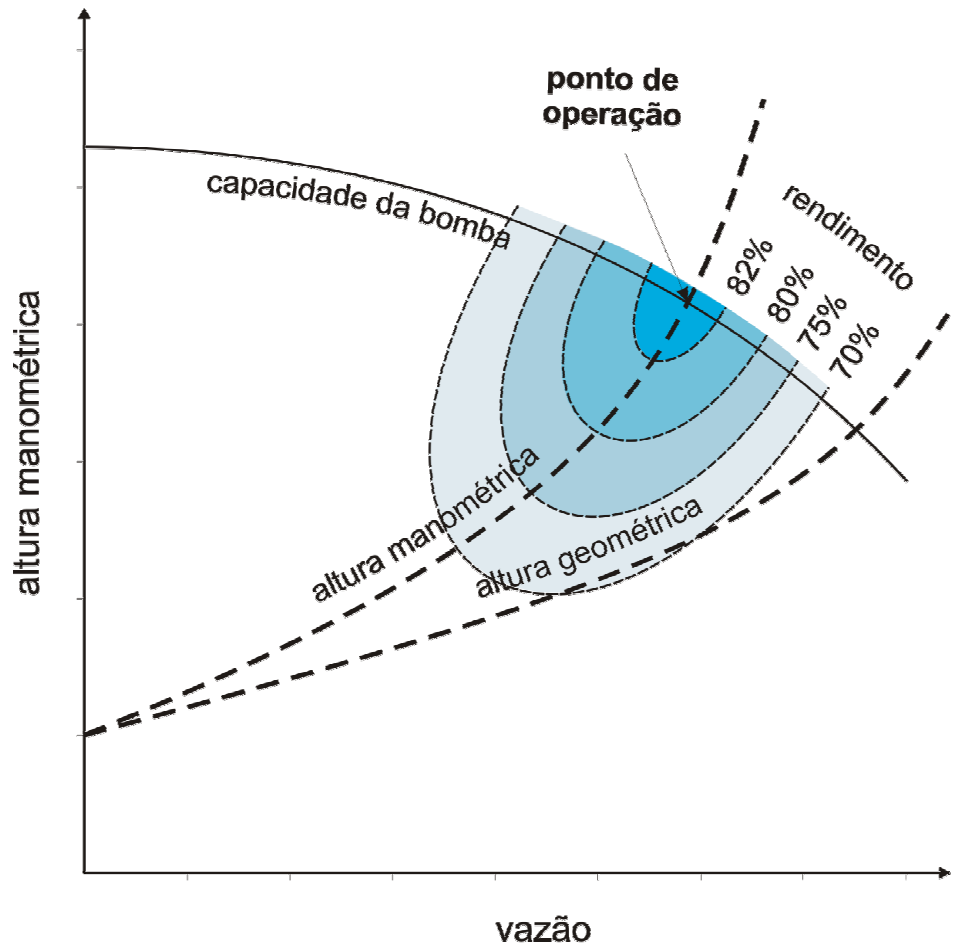


Figura 7: Gráfico esquemático das curvas de demanda do sistema (poço) e curvas de performance da bomba (adaptado de LÜDECKE & BOLDT, 2004).

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 6**.

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, como informam LÜDECKE & BOLDT (2004) de que a KSB 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 Figuras 8 e 9 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.

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		

Figura 8: Sumário dos dados do poço a serem monitorados durante a operação, reproduzido de JORBA & ROCHA (1982)

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.

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

Figura 9: Sumário dos dados do conjunto de bombeamento a serem monitorados durante a operação, reproduzido de JORBA & ROCHA (1982)

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 (cociente entre os dois valores de potência requerida / consumida). Adaptando-se as fórmulas propostas para unidades métricas resultam nas seguintes equações:

Equação para cálculo da potência requerida:

$$P_r = \frac{9,8 \times Q \times AMT}{\eta} \dots\dots\dots(5)$$

onde:

P_r = potência requerida (kW)

Q = vazão (m³/s)

AMT = altura manométrica total (m)

η = rendimento do sistema de bombeamento

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

$$P_{C_1} = \sqrt{3} \times I \times V \times \cos \phi \dots\dots\dots(6)$$

onde:

P_{C_1} = potência consumida (kW)

I = corrente elétrica (A)

V = tensão elétrica (V)

$\cos \phi$ = fator de potência

4. METODOLOGIA

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.

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 ½" 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 à alterações constantes de programação do sistema, a recuperação dos **back-up's** de um ano para outro se torna praticamente impossível.

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 explotados 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 1: 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 serem 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 5**, apresentada anteriormente, modificada da seguinte forma:

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

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 do rendimento η_1

No cálculo do rendimento η_1 será empregado o valor da potência consumida calculado segundo a **equação 6**, 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 ($\cos\phi$) 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.

4.4.2. 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 10**. 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 90° 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 e 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.

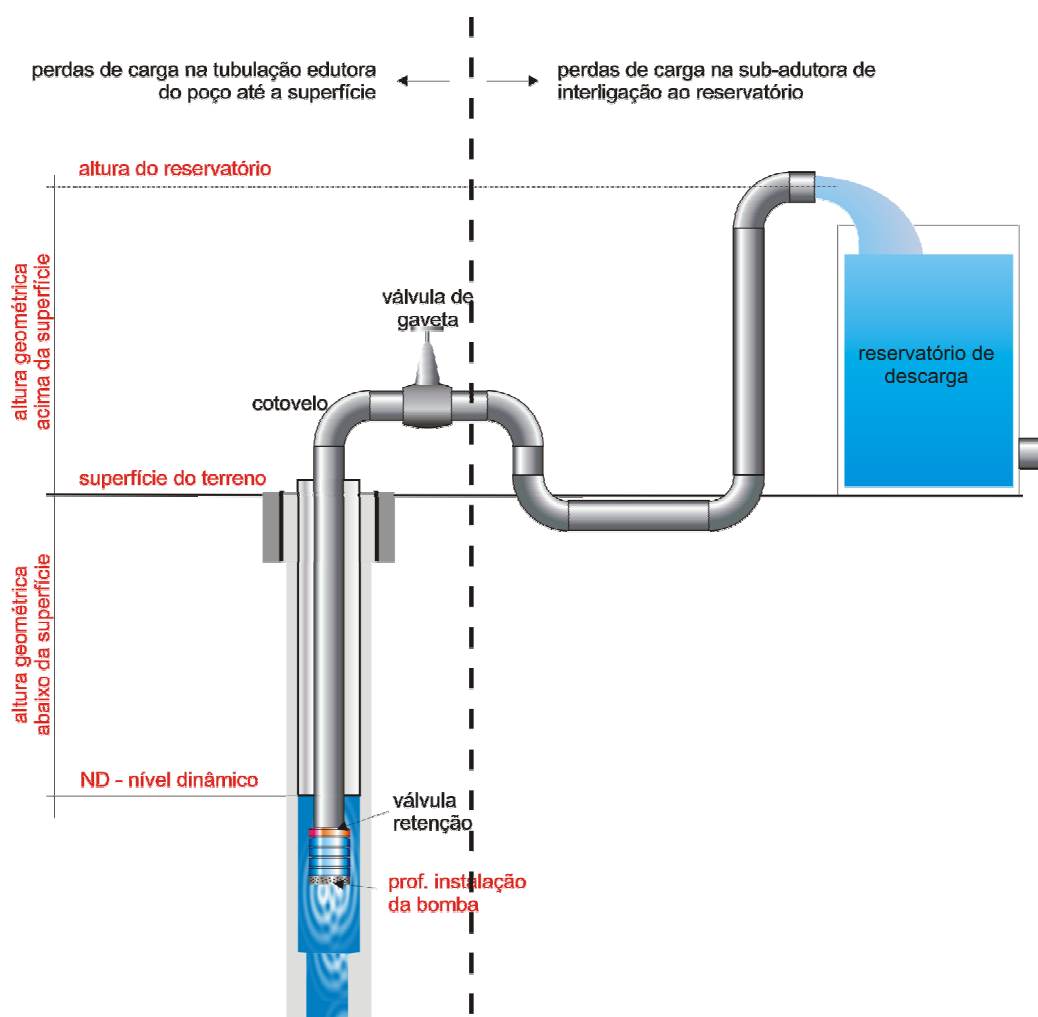


Figura 10: Esquema ilustrativo dos componentes da altura manométrica total (AMT)

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 (9) e (10). A solução da equação (9) foi obtida por meio da ferramenta **solver** do Excel da Microsoft e posteriormente aplicada na equação (10).

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

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{R_e \sqrt{f}} \right) \dots \dots \dots (9)$$

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:

$$\Delta h = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \dots \dots \dots (10)$$

onde: **Δh** : perda de carga (m)

f: fator de atrito, calculado pela equação (9)

L: comprimento da tubulação (m)

D: diâmetro da tubulação (m)

V: velocidade do fluxo (m/s)

g: aceleração da gravidade (m²/s)

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:

$$CP = CT \times \frac{PNP}{PNP + (PTF \times PNR)} \dots\dots\dots(11)$$

Na aplicação da **equação 8** 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 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 é de origem superficial, captada em três cursos de água, providos de barragens, conforme dados da **Tabela 2**.

Tabela 2: 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		400 mm de FoFo	3 bombas 100 cv

Na **Tabela 3** 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 3: 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 11**, 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 durante 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 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.

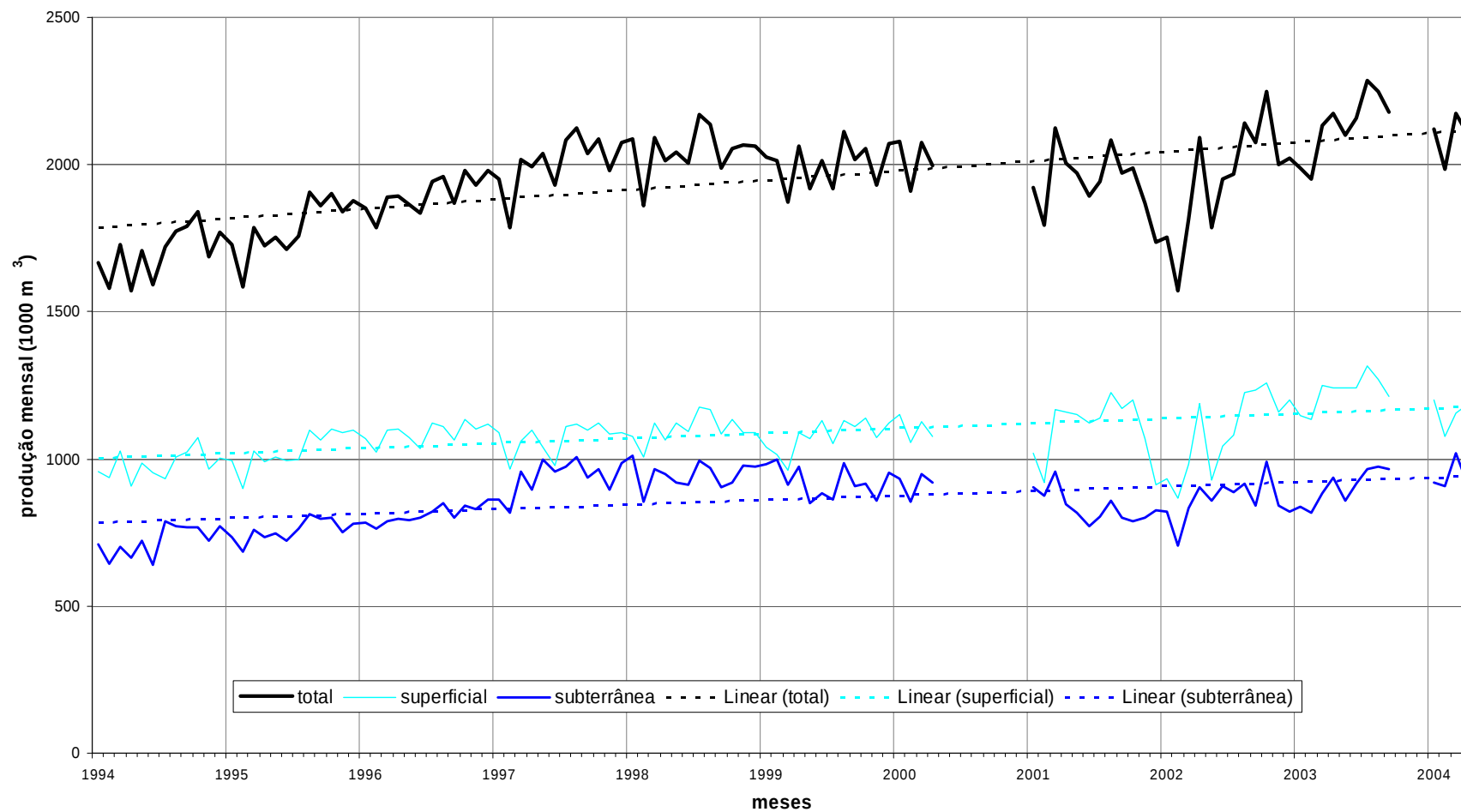


Figura 11: Gráfico com dados fornecidos pelo SAAE de produção mensal de água superficial e subterrânea, no período de 1994-2004, para abastecimento da cidade de São Carlos

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Avaliação hidrogeológica

6.1.1. Feições geológicas da área

Segundo IPT (2004), na área da cidade de São Carlos, ocorrem, em superfície, sedimentos clásticos, predominantemente arenosos (Formação Botucatu), e rochas ígneas basálticas (Formação Serra Geral) do Grupo São Bento (Mesozóico da Bacia do Paraná), rochas sedimentares do Grupo Bauru (Cretáceo Superior da Bacia de Bauru), sedimentos cenozóicos da Formação Itaqueri e depósitos correlatos (das serras de São Carlos e Santana), depósitos aluvionares associados à rede de drenagem, coluviões e eluviões. Segundo ALAMEIDA et al (1981), em AGUIAR (1989), a deposição das formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral (Grupo São Bento), ocorreu do Jurássico Médio-Superior ao Cretáceo Inferior.

No mapa geológico simplificado da área, em escala 1:25.000, apresentado por AGUIAR (1989), as áreas de ocorrências das rochas sedimentares do Grupo Bauru não são diferenciadas por formação e englobam as ocorrências de seqüências posteriores, como a Formação Itaqueri e sedimentos correlatos da Serra de São Carlos e Santana. As publicações mais recentes, tais como: FERNANDES & COIMBRA (1992), FERNANDES & COIMBRA (1992), RICCOMINI (1995 e 1997), FERNANDES & COIMBRA (1996), FERNANDES (1998), citadas em IPT (2004), apresentam propostas de novas subdivisões, nomenclatura de formações e grupos e alterações da estratigrafia do Grupo Bauru. No entanto, essas classificações geológicas não apresentam importância para o presente trabalho e assim foi mantida, em mapa, a área de ocorrência do Grupo Bauru indiviso.

Na **Figura 12** é apresentado um mapa geológico simplificado da área, adaptado a partir do mapa, em escala 1:25.000, apresentado por AGUIAR (1989), sobre o qual, o traçado da cidade e os limites da zona urbana são apresentados, conforme levantamento aerofotogramétrico, em escala 1:10.000, segundo BTA ENGENHARIA (1989), no qual são delimitadas as seguintes unidades litoestratigráficas:

- **Grupo Bauru** – de idade cretácica superior, correlacionável à Formação Marília, representado por arenitos mal selecionados, castanho claro, médio a grosseiros, imaturos, com níveis conglomeráticos basais, ocorrendo nas partes mais altas do terreno e com espessura máxima de poucas dezenas de metros. A delimitação em mapa engloba sedimentos da Fm. Itaqueri e a cobertura da Serra de São Carlos e Santana;
- **Formação Serra Geral** – rochas efusivas do tipo basaltos, com ocorrência nas cotas intermediárias e nos fundos de vale, apresenta espessura de até 250 m, podendo apresentar camadas de arenito interderrame, similar ao da formação subjacente (Botucatu);
- **Formação Botucatu** – arenitos finos a muito finos, muito bem selecionados, constituídos de grãos arredondados de quartzo fosco, com ocorrência nas porções mais baixas da área e espessura máxima de 200 m. A Fm. Botucatu apresenta uma grande área de afloramento com cerca de 53 km², dominando o setor sul e uma faixa do extremo noroeste. A sua área de ocorrência é predominantemente plana, porém ocorre também em escarpas abruptas e morros testemunho. Em alguns locais apresenta forte silicificação e recristalização, constituindo quartzitos maciços, explorados nos arredores da cidade de São Carlos, para construção civil e pavimentação de passeios públicos;

- **Formação Pirambóia** - sem afloramentos na área, mas com grandes áreas de exposição a alguns quilômetros à leste do limite do mapa, porém ocorre em sub-superfície, sendo representada por arenitos finos a grosseiros e até mesmo conglomeráticos, constituídos de grãos sub-arredondados, hialinos e esbranquiçados, com matriz argilosa. Apresenta em alguns locais, com maior incidência junto ao contato basal, a presença de rochas básicas intrusivas, formando diques e sills de diabásio.
- **Formações Paleozóicas e embasamento** – nenhuma, das perfurações já realizadas na área, atravessou integralmente a seqüência sedimentar, devendo existir, em sub-superfície, diversas centenas de metros de rochas sedimentares das formações paleozóicas da Bacia do Paraná, antes de se atingir o embasamento cristalino de idade pré-cambriana.

Estruturas - as feições estruturais mais destacadas da área são os lineamentos marcados pela drenagem superficial e alguns contatos geológicos, com direção predominante NW e subordinadamente NE. Segundo Riccomini (1995, 1997), em IPT (2004), existem dois feixes de estruturas regionais que se interceptam na área da cidade de São Carlos: um com direção WNW (São Carlos – Leme) e outro de direção NNW (alinhamento do Rio Moji-Guaçu). Os perfis litológicos dos poços do SAAE, indicam a existência de um falhamento de direção NW, com o bloco rebaixado a NE, na porção SE da área da cidade de São Carlos, conforme indicado no mapa. No entanto, o detalhamento da geologia de sub-superfície não foi realizado por extrapolar os objetivos do presente trabalho. O estudo mais detalhado dos perfis litológicos e geofísicos se faz necessário, para estabelecer as correlações geológicas entre os perfis dos poços (do SAAE e de particulares) e a elaboração de seções geológicas verticais, mapas de isópacas e isóbatas.

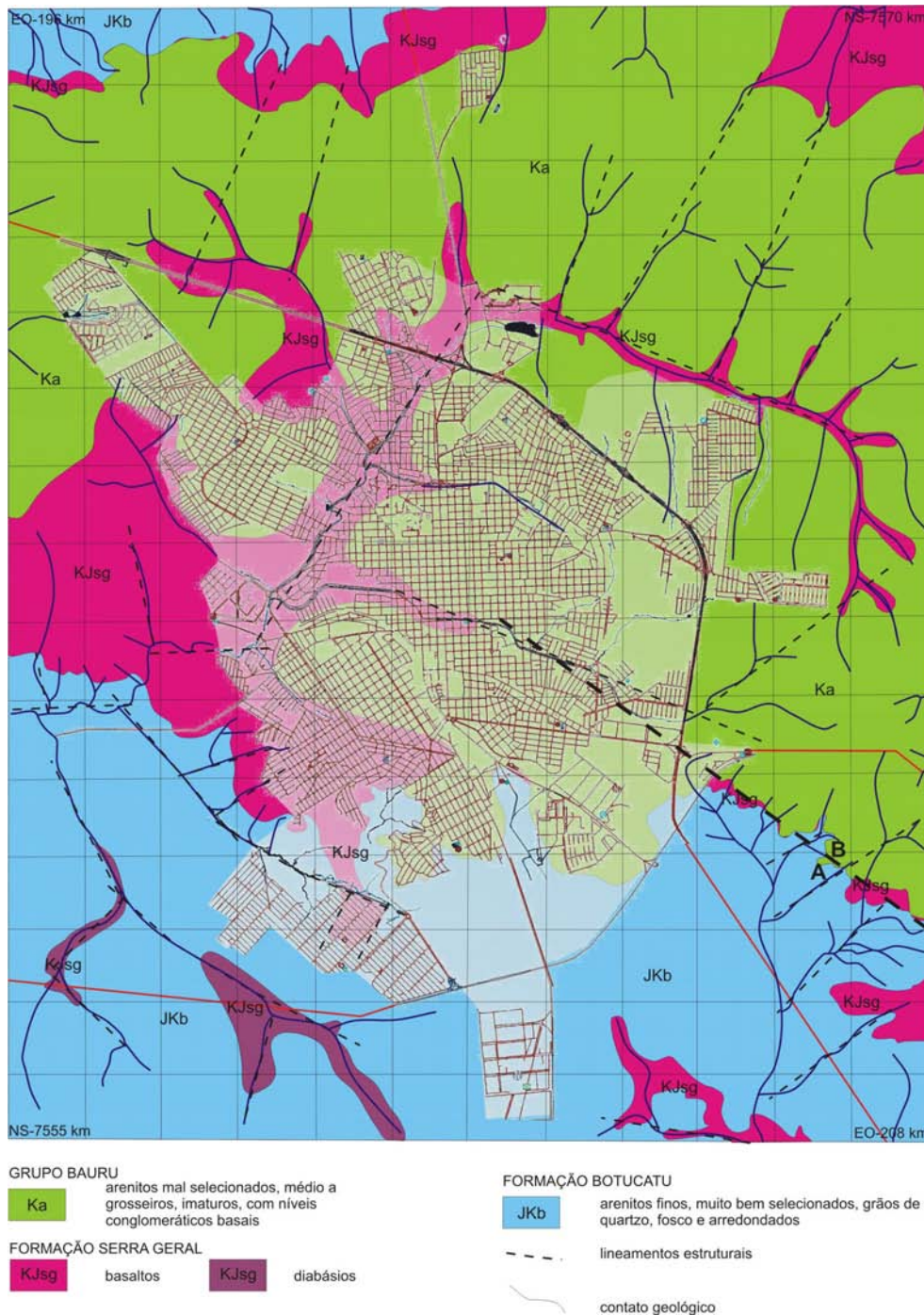


Figura 12: Mapa geológico simplificado da área da cidade de São Carlos (adaptado de Aguiar, 1989)

6.1.2. Caracterização dos aquíferos

Em função do contexto geológico da área, são identificados os aquíferos descritos a seguir, com indicação do respectivo símbolo entre parênteses:

- **Aqüífero Bauru (B)** – aqüífero intergranular, livre e semi-confinado, com área de ocorrência, espessura e capacidade restritas e potencial de aproveitamento em poços rasos e de baixa produção. O contato inferior, dos sedimentos com as rochas basálticas, propicia a ocorrência de diversas nascentes, na área urbana de São Carlos, as quais são alimentadas por esse aqüífero.
- **Aqüífero Serra Geral (bas)** – aqüífero fissural, livre e semi confinado, com forte anisotropia, decorrente da grande variação dos parâmetros hidráulicos da rocha basáltica que, segundo Aguiar (1989), pode apresentar condutividade hidráulica de 10^{-1} a 10^{-3} cm/s, nas áreas onde se encontra intensamente fraturado e 10^{-5} cm/s, quando compacto. Esse aqüífero tem sido bastante explorado na área, em geral de forma conjunta com o aqüífero subjacente (Guarani), em poços parcialmente revestidos, de baixa produção, com grande vulnerabilidade às contaminações bacteriológicas, causadas por fossas sépticas e vazamentos da rede coletora de esgotos. Alguns poços do SAAE, principalmente os mais antigos, atravessam as rochas basálticas e atingem o Aqüífero Guarani e captam os dois aqüíferos simultaneamente (**bas/G**).
- **Sistema Aqüífero Guarani (G)** – aqüífero majoritariamente intergranular e eventualmente fissural constituído pelas formações Botucatu e Pirambóia, na área pode se apresentar como livre (**G**) e semi-confinado (**Gc**). Nas áreas de afloramento, segundo PORTILLO (1988) em AGUIAR (op. cit.), os arenitos apresentam silicificação dos espaços intersticiais, o que provoca variações da porosidade de 12% até 1%. Conforme dados da **Tabela 4**, os ensaios de bombeamento realizados logo após a construção dos poços apresentaram valores da condutividade hidráulica variando de 0,6 a 1,4 m/d e média de 0,9 m/d. O valor médio da vazão específica é de 5,1 m³/h/m.

Tabela 4: Parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Guarani, determinados nos poços do SAAE de São Carlos

nº do poço	resultados de ensaio de bombeamento inicial							
	data	prof. NE (m)	prof. ND (m)	Q (m³/h)	Q/s (m³/h/m)	T (m²/dia)	espessura do aquífero (m)	K (m/dia)
9	01/01/86			120,0				
11	01/01/87	52,5	88,9	138,8	3,81			
12	27/10/88	145,6	168,2	164,5	7,25			
15	24/08/92	146,6	192,5	202,1	4,40	197	189	1,04
16	02/09/92	103,2	142,8	240,5	6,07	378	266	1,42
17	03/02/94	64,8	119,7	300,0	5,47		256	
20	15/10/96	144,0	164,8	157,8	7,59		202	
21	24/03/98	100,2	153,0	97,8	1,85	132	202	0,65
23	14/06/99	132,5	157,0	145,0	5,91		172	
24	06/01/01	155,9	195,4	192,7	4,87	121	192	0,63
28	30/09/03	83,8	128,7	182,2	4,06		144	
média		112,9	151,1	176,5	5,1	207,1	202,9	0,9

6.1.3. Dados gerais dos poços do SAAE

Os dados gerais dos poços utilizados pelo SAAE para abastecimento público, constam da **Tabela 5** e suas localizações são indicadas na **Figura 13**. A sequência de numeração dos poços aqui adotada se baseia na data de construção, sendo que o poço mais antigo do qual foi possível obter informações foi construído em 1962. Estão relacionados todos os poços que integram ou integraram o sistema de abastecimento público até Abril/2004, dos quais 19 encontravam-se em uso e dois poços novos ainda não tinham entrado em operação. O poço nº 19 não pertence ao SAAE mas é operado em regime de locação e integra o sistema público de abastecimento.

A idade dos 21 poços ativos apresenta a seguinte distribuição:

- 12 poços com idade de até 10 anos;
- 6 poços com idade de 10 a 20 anos; e
- 3 poços com idade de 20 a 35 anos.

Os sete poços inativos são, em geral, poços mais antigos, que apresentaram queda de produção, produção de água “barrenta” e contaminação bacteriológica. Alguns desses poços encontram-se ainda equipados com bomba, de forma que podem ser eventualmente utilizados temporariamente, em situação de emergência.

O agrupamento dos poços com base nos perfis geológicos e características construtivas, resulta em:

- 3 poços com profundidade inferior a 200 m, os quais captam o Aquífero Serra Geral (fraturas da rocha basáltica e arenito interderrame) e o Aquífero Guarani livre;
- 9 poços, com profundidade de 200 a 300 m, que captam o Aquífero Guarani livre; e
- 9 poços, com profundidade de 300 a 480 m, que captam o Aquífero Guarani confinado.

Com exceção dos poços que captam o Aquífero Guarani confinado, os demais apresentam diâmetro de 6 e 8”. Os poços que captam o Aquífero Guarani possuem câmaras de bombeamento com diâmetros de 10 a 14”, de forma a viabilizar a extração de vazões elevadas, cujas profundidades variam de 200 a 300 m e, portanto penetram no aquífero, razão pela qual possuem intercalações de filtros. Apenas o último poço construído é exceção a esta regra pois apresenta um único diâmetro de revestimento e filtros, com 14”.

Tabela 5: Dados gerais dos poços tubulares do SAAE

n°	nome local	coordenada UTM (km)		cota (m)	data construção	prof. total (m)	(1) aquífero	câmara bombeamento			diâmetro filtros (pol)	(2) poço inativo
		NS	EW					prof. redução (m)	diâmetro (pol)	filtros intercalados		
1	Água Vermelha I	7.575,70	200,62	820,00	1962	68	G					3
2	Antônio Fischer dos Santos	7.562,06	201,90	808,50	1969	130	bas/G		8		8	
3	Novo Horizonte	7.560,35	205,58	891,90	1979		bas/G		6		6	2
4	Parque Delta	7.565,65	200,90	850,00	1979	151	bas		6			1
5	Distrito Industrial MA	7.559,55	203,62	872,80	1980	165	bas/G		8		8	2
6	Santa Marta I	7.565,29	200,03	821,10	1981	172	bas		6			3
7	Santa Marta II	7.565,13	199,85	829,30	1981	150	bas		6			2
8	Samambaia	7.569,65	202,26	834,20	1983	167	G		8		8	
9	Maria Stela Fagá	7.564,70	205,00	855,20	1986	387	Gc	256	10		6	
10	Água Vermelha II	7.575,76	200,65	819,00	1987	84	bas		6		6	1
11	Azuville II	7.561,30	203,98	841,10	1987	290	Gc	156	12		6	
12	São Carlos III	7.565,38	198,03	872,90	1988	457	Gc	235	12	x	8	
13	Jockey Club I	7.566,85	200,55	862,40	1990	235	Gc		8		8	1
14	Parque Faber	7.562,19	198,59	814,20	1991	213	bas/G		6		6	
15	Santa Felicia	7.564,46	198,88	864,00	1992	465	Gc	270	13		8	
16	Boa Vista	7.560,28	200,86	852,90	1992	345	Gc	225	10		8	
17	Cidade Aracy	7.557,53	200,23	807,40	1994	393	Gc	240	14	x	8	
18	Santa Eudoxia	7.590,95	210,80	650,00	1994	208	G		8		8	
19	Tramer	7.560,40	205,04	890,20	1995	300	G	201	10		8	
20	Vila Nery	7.563,32	203,78	903,90	1996	484	Gc	327	12	x	8	
21	Cruzeiro do Sul	7.559,17	201,80	863,30	1998	293	G	180	13	x	8	
22	Parque Fehr	7.566,70	197,15	861,50	1998	270	G	192	8		4	
23	Jockey Club II	7.566,89	200,54	862,70	1999	356	Gc	243	13	x	8	
24	Nova Estância	7.564,74	202,44	870,60	2000	479	Gc	270	13		8	4
25	Douradinho	7.562,40	206,01	920,60	2002		G					
26	Núcleo Habitacional WLS	7.559,97	202,39	843,70	2002	277	G	223	10	x	6	
27	Água Vermelha III	7.575,70	200,61	824,00	2003	255	G		6		6	
28	Vila Alpes	7.560,77	203,15	877,30	2003	292	G		14		14	4
FONTE: Relatórios das empresas perfuradoras, coordenadas e altitude fornecidas pelo SAAE							bas	basalto			1	inativo com bomba
						(1) aquífero	bas/G	basalto e Guarani	(2) poço inativo		2	inativo sem bomba
							G	Guarani			3	abandonado
							Gc	Guarani confinado			4	não operado

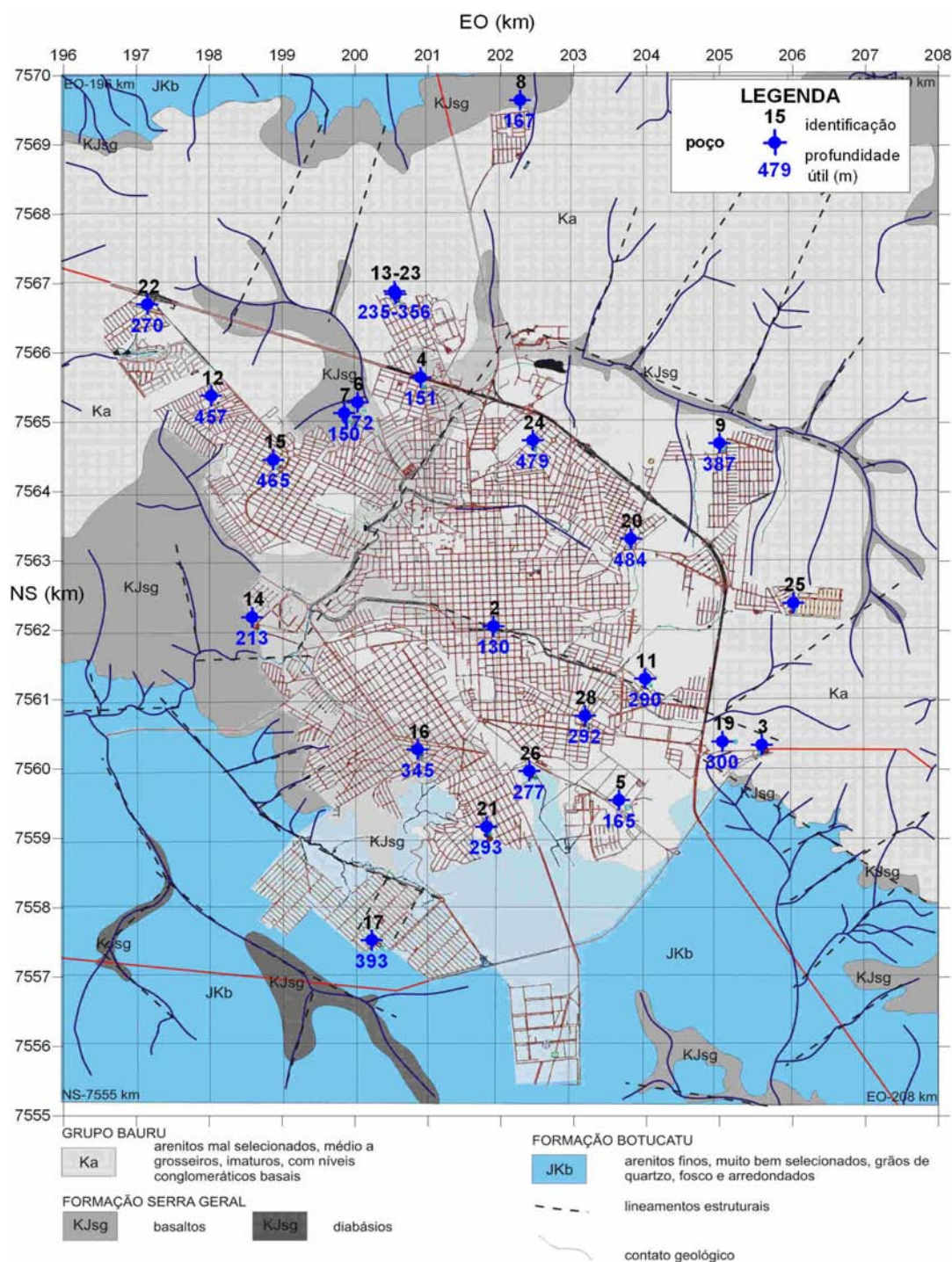


Figura 13: Planta da área de São Carlos, com representação do substrato geológico, indicação da localização, número de identificação e profundidade útil (m) dos poços do SAAE.

6.1.4. Análise da exploração atual dos aquíferos na área

O Guarani é o principal aquífero de São Carlos e vem sendo intensamente explorado desde a década de 1960, principalmente para o abastecimento público e uso industrial em poços de 200 até quase 500 m de profundidade e produção individual de 100 a 300 m³/h.

Segundo IPT (2000), entre os 34 municípios inseridos na Bacia Hidrográfica do Tiete / Jacaré, 18 utilizam ³ água de superfície, mas apenas 3 deles são abastecidos exclusivamente com água superficial, ao passo que 16 utilizam apenas água subterrânea e, no total, a água subterrânea representa 60,2% da água utilizada para abastecimento público. Pelos dados apresentados em IPT (op. cit.), pode-se deduzir que o Aquífero Guarani representa, pelo menos 81% dessa parcela.

Para permitir uma avaliação da intensidade atual de exploração da água subterrânea na área, foram levantados, junto ao DAEE-Araraquara, as outorgas de direito de uso em vigência ou em tramitação na área da cidade de São Carlos, os quais são sumarizados nas **Tabelas 5 a 8**.

Segundo informações verbais dos funcionários do DAEE, mais da metade dos poços para os quais são solicitadas licenças para perfuração, não é feita posteriormente a solicitação de outorga de direito de uso e portanto não estão inclusos nas tabelas aqui apresentadas. No entanto, considera-se que a quase totalidade dos poços de alta produção consta das tabelas e, portanto, mesmo admitindo que possa existir igual número de poços em situação de uso irregular, os quais não estariam incluídos na relação, esses não modificariam sensivelmente as somatórias de vazões outorgadas por apresentarem baixa produção.

³ A água é utilizada para abastecimento público da área urbana da sede municipal e eventuais distritos

Tabela 6: Outorgas de direito de uso da água dos poços do SAAE

nº poço	nome	E/O (km)	N/S (km)	cota (m)	prof. (m)	aquífero	Q (m³/h)	func. (h/dia)	Q (1000 m³/mês)
1	Água Vermelha I	200,62	7.575,70	820	68	G			
2	Antônio Fischer dos Santos	201,90	7.562,06	809	130	bas/G	52	19	30
3	Novo Horizonte	205,58	7.560,35	892		bas/G	7	2	0
4	Parque Delta	200,90	7.565,65	850	151	bas			
5	Distrito Industrial MA	203,62	7.559,55	873	165	bas/G	40	12	14
6	Santa Marta I	200,03	7.565,29	821	172	bas			
7	Santa Marta II	199,85	7.565,13	829	150	bas			
8	Samambaia	202,26	7.569,65	834	167	G	16	12	6
9	Maria Stela Fagá	205,00	7.564,70	855	387	Gc	104	21	65
10	Água Vermelha II	200,65	7.575,76	819	84	bas			
11	Azuville II	203,98	7.561,30	841	290	Gc	122	19	70
12	São Carlos III	198,03	7.565,38	873	457	Gc	137	14	58
13	Jockey Club I	200,55	7.566,85	862	235	Gc	35	23	24
14	Parque Faber	198,59	7.562,19	814	213	bas/G			-
15	Santa Felícia	198,88	7.564,46	864	465	Gc	260	20	156
16	Boa Vista	200,86	7.560,28	853	345	Gc	216	20	129
17	Cidade Aracy	200,23	7.557,53	807	393	Gc	192	19	106
18	Santa Eudoxia	210,80	7.590,95	650	208	G			-
19	Tramer	205,04	7.560,40	890	300	G	30	5	5
20	Vila Nery	203,78	7.563,32	904	484	Gc	265	20	159
21	Cruzeiro do Sul	201,80	7.559,17	863	293	G	118	18	64
22	Parque Fehr	197,15	7.566,70	862	270	G	70	20	42
23	Jockey Club II	200,54	7.566,89	863	356	Gc	200	20	120
24	Nova Estância	202,44	7.564,74	871	479	Gc	250		150
25	Douradinho	206,01	7.562,40	921		G			-
26	Núcleo Habitacional WLS	202,39	7.559,97	844	277	G	130	20	78
27	Água Vermelha III	200,61	7.575,70	824	255	G			-
28	Vila Alpes	203,15	7.560,77	877	292	G	250	20	150
total									1.425

FONTE: DAEE - Araraquara

Tabela 7: Poços com outorga de direito de uso da água – Aquífero Bauru

nº poço	proprietário	E/O (km)	N/S (km)	cota (m)	prof. (m)	Q (m³/h)	func. (h/dia)	Q (1000 m³/mês)
1	Alcione Gonçalves da Silva - Supermercado	203,34	7.563,18	883	60,0	3,0		1,80
2	Alvaro Teixeira dos Reis - Chácara 17	207,66	7.555,76	800	23,0	1,0	2,0	0,06
3	Antonio Aparecido Carbinatto	207,49	7.555,52	781	17,0	1,4	0,1	0,01
4	ASSER - Assoc. de Escolas Reunidas	197,32	7.566,31	862	44,6	4,0	16,0	1,92
5	Celso das Silva Muniz - Chácara 107	207,54	7.555,60	796	23,0	1,0	4,0	0,12
6	Clayton Camargo Barbosa	207,54	7.555,36	786	13,0	1,4	0,1	0,01
7	Edson José de Toledo	207,63	7.555,21		10,0	1,0	3,0	0,09
8	Esporte Clube Banespa	207,69	7.555,28	783	23,0	1,4	0,1	0,01
9	Gislaine Aparecida Gobbi	207,13	7.555,61	787	10,0	1,0	1,0	0,03
10	Helio Delello	207,52	7.555,55	795	23,0	1,4	0,1	0,01
11	Hermelindo Orlandi	207,83	7.555,60	793	31,6	1,4	0,1	0,01
12	Icems Ind. e Com. de Equipamentos Ltda	197,87	7.566,68	860	80,0	5,0		3,00
13	Industria de Implementos Agrícola Siltomac Ltda	207,35	7.560,30		10,0	1,0	4,0	0,12
14	Jejuino Vidotti	207,49	7.555,43	790	17,0	1,4	0,1	0,01
15	Jejuino Vidotti	207,42	7.555,53	795	21,0	1,4	0,2	0,01
16	João de Almeida - Sítio Rancho Azul	196,44	7.566,12		6,0	1,0	1,0	0,03
17	João de Almeida - Sítio Rancho Azul	196,37	7.566,11		7,0	1,0	1,0	0,03
18	João de Almeida - Sítio Rancho Azul	196,25	7.566,08		9,0	1,0	1,0	0,03
19	João de Almeida - Sítio Rancho Azul	196,14	7.566,13		10,4	1,0	1,0	0,03
20	João de Almeida - Sítio Rancho Azul	196,14	7.565,99		8,0	1,0	1,0	0,03
21	José Carlos Lopes	207,42	7.555,67	796	23,0	1,4	0,1	0,01
22	José Paulo Bos Pares - Chácara 77	207,84	7.555,42	787	22,5	1,4	0,1	0,01
23	Kasuo Aisawa	207,11	7.559,16		18,0	1,0	4,0	0,12
24	Luisir Carlos Pereira	207,40	7.555,36	785	13,0	1,0	0,2	0,01
25	Marcos Roberto Gonçalves - Chácara Pedra Branca	207,54	7.555,48		18,0	1,0	4,0	0,12
26	Mendes Jr. Trading e Eng. S/A	202,76	7.559,14		60,0	4,0		2,40
27	Orlando Varanda	207,79	7.555,69	795	25,5	1,4	3,0	0,13
28	Rogério Zanin Vaz	207,77	7.555,40	787	20,0	1,0	3,0	0,09
29	São Carlos Country Club	203,27	7.564,59	870	8,4	2,0	20,0	1,20
30	São Carlos Country Club	203,33	7.564,56	870	9,6	2,0	20,0	1,20
31	São Carlos Country Club	203,34	7.564,59	870	10,1	2,0	20,0	1,20
32	São Carlos Country Club	203,34	7.564,95	870	10,2	2,0	20,0	1,20
33	São Carlos Country Club	203,35	7.564,02	870	9,8	2,0	2,0	0,12
34	Waldemar Ibelli	207,86	7.555,53	787	26,5	1,0	3,0	0,09
total								15,22

FONTE: DAEE - Araraquara

Tabela 8: Poços com outorga de direito de uso da água – Aquífero Serra Geral

nº poço	proprietário	E/O (km)	N/S (km)	cota (m)	prof. (m)	Q (m³/h)	func. (h/dia)	Q (1000 m³/mês)
1	C.P.F.L. - Geração de Energia - Usina Monjolinho	197,83	7.561,63	700	80,0	2,0		1,20
2	Caiado e Silva Ltda - Auto Posto Millennium	198,54	7.563,60		100,0	2,0		1,20
3	Cia Bras. de Distribuição - Extra São Carlos	199,05	7.562,21		146,0	18,0	20,0	10,80
4	Clube Atlético Paulistinha - Recanto Tio Patinhas	202,00	7.565,43		100,0	7,0		4,20
5	Elson Longo - Chácaras Recreio Monte Alegre	205,33	7.563,35	920	185,0	3,0		1,80
6	Fund. Parq. de A.Tecnologia São Carlos - PARQTEC	203,20	7.557,15	830	130,0	5,0		3,00
7	Genarex Controles Gerais Ind. e Com. Ltda	200,35	7.566,43	860	91,0	12,0	12,0	4,32
8	Gonçalves e Silva Ltda - Supermercado	201,59	7.563,79	795	80,0	3,0		1,80
9	Henrique H. J. - Granjas Hilderbrand Ltda	202,81	7.565,13	864	130,0	50,0	11,0	16,50
10	Hotel dos Pitanguias Ltda - ME	204,83	7.562,55	905	140,0	2,0	15,0	0,90
11	Lopes e Lopes São Carlos Ltda - Posto Esplanada	201,21	7.565,71	845	110,0	1,5		0,90
12	Opto Eletrônica S/A	198,64	7.564,18		100,0	2,0		1,20
13	Saber Amar	202,13	7.563,56	850	100,0	3,0		1,80
14	SESC	200,15	7.562,40	810	165,0	9,0	18,0	4,86
15	Volkswagen do Brasil Ltda	204,50	7.557,99		96,0	8,0	20,0	4,80
total								59,28

Tabela 9: Poços com outorga de direito de uso da água – Aquífero Guarani

nº poço	proprietário	E/O (km)	N/S (km)	cota (m)	prof. (m)	Q (m³/h)	func. (h/dia)	Q (1000 m³/mês)
1	A. W. Faber Castell S/A	201,40	7.561,60	810	270,0	30,0	6,0	5,4
2	A. W. Faber Castell S/A	203,31	7.559,60	880	225,0	30,0	20,0	18,0
3	Accor Admin. de Hoteis Economicos do Brasil S/A - II	198,77	7.562,28	805	193,0	5,1	11,0	1,7
4	Agenor Rodrigues Camargo - Giovanella - Produtos A	203,95	7.563,75	890	284,0	9,0	0,0	0,0
5	América Imp. e Export. de Aves Ltda	206,76	7.558,06	820	80,0	5,0		3,0
6	Assoc. Bras. de Educ. Lassalistas - Centro Educ. Dior	200,50	7.561,95	830	150,0	10,0	30,0	9,0
7	Azouri Plaza Hotel Ltda	201,48	7.562,55	800	150,0	6,0	2,0	0,4
8	Cardinali Ind. e Com. Ltda	203,42	7.560,22	875	150,0	6,0	5,0	0,9
9	Cardinali Ind. e Com. Ltda	203,54	7.560,39	875	160,0	15,0	4,0	1,8
10	CDHU	202,40	7.559,99	850	280,0	120,0		72,0
11	Condominio Shopping Center Iguatemi São Carlos	199,20	7.562,35	750	245,2	30,0	5,0	4,5
12	Controeste Ind. e Com. Ltda	202,78	7.556,58	830	100,0	10,0	1,0	0,3
13	Coop. de Laticínios São Carlos e Rio Claro - COLASC	201,53	7.560,85	825	272,0	10,0	20,0	6,0
14	Damha Urb. e Const. Ltda - Fazenda do Urso	200,36	7.568,42	880	353,6	150,0	12,0	54,0
15	Digmotor Equipam. Eletromecanicos Digitais Ltda	202,83	7.556,43	840	54,0	5,5	7,0	1,2
16	Emoções Nigth Club Bar Ltda - Boate Genaro	206,17	7.556,72	780	50	1,25	6	0,2
17	Encalso Construções Ltda - Parque Residencial Damh	200,81	7.568,17	880	250	150	20	90,0
18	Faber - Castell Projetos Imobiliários S/A - Loteamento	199,83	7.563,44	840		200		120,0
19	FUFSCAR - Fund. Universidade Federal de São Carlo	202,45	7.566,25		240	70		42,0
20	Fultec Inox Ltda	202,82	7.556,19	830	80	2		1,2
21	HB - Empreend. Imobiliários Ltda - Faz. Embaré	197,05	7.567,85		350	120	20	72,0
22	Hildebrand Alimentos Ltda - FRUTIL	202,13	7.565,13	860	235	11,5	20	6,9

Tabela 9: Poços com outorga de direito de uso da água – Aquífero Guarani (continuação)

nº poço	proprietário	E/O (km)	N/S (km)	cota (m)	prof. (m)	Q (m³/h)	func. (h/dia)	Q (1000 m³/mês)
23	HMP - Eng. e Const. Ltda	198,77	7562,28	805	150	4		2,4
24	Incoplás Ind. de Componentes Plasticos Ltda	202,3	7559,5	842	124	16	3	1,4
25	Ind. de Implementos Agrícolas Siltomac Ltda	207,25	7560,22	930	242	10	10	3,0
26	Inoye e Forgerini Ltda - Auto Posto Pantanal	201,6	7564,95	850	222,6	5,5	8	1,3
27	Inst. Paulista de Ensino Superior - Faculdade de Direit	204,6	7562,81	910	215	12	20	7,2
28	Luisir Carlos Pereira	207,38	7555,29	785	50	4,5	1	0,1
29	Malhas Fiandeiras Ltda	196,76	7567,16	855	260	31,5	20	18,9
30	MAV Paulino e Cia Ltda	206,4	7556,83	785	70	6,5	2	0,4
31	Mendes Jr. Trading e Eng. S/A - Est. De Comp. do Ga	196,19	7557,36		112	5	4	0,6
32	Nivaldo Aparecido Correa	207,97	7555,26	780	54	1,1	4	0,1
33	Omar Abdelnur Jr. e Outros - Loteamento Res. Jd. Gr	198,34	7558,77	755	300	100		60,0
34	Orlando Peixoto	207,67	7555,33	800	50	3,6	1	0,1
35	Pecuária Damha Ltda - Faz. Do Urso	201,05	7568,1	885	226	12	20	7,2
36	Posto Pantanal Cruzeiro do Sul Ltda	201,44	7559,87	760	120	10		6,0
37	Prominas Brasil Equipamentos Ltda	202,07	7559,07		156	2	20	1,2
38	PVB - Empr. e Const. Ltda - Res. Bosque de São Carl	201,87	7568,75		250	50	20	30,0
39	Rei Frango Abatedouro Ltda	202,83	7565,22	862	115	115	7	24,2
40	Rubens Bruno	207,32	7555,34	790	50	4	1	0,1
41	Samir Abdelnur - Sítio Santana	206,519	7559,874	930	200	5		3,0
42	São Carlos Clube	201,07	7563,42	852	171	30	20	18,0
43	SESI	202,45	7560,3	850	202	12	4	1,4
44	Tapetes São Carlos Ltda	202,57	7563,14	870	305	20	5	3,0
45	Tapetes São Carlos Ltda	202,45	7563,21		270	12	8	2,9
46	Tecelagem São Carlos S/A	197,65	7559,4	732	85	11,8	6	2,1
47	Tecelagem São Carlos S/A	201,74	7561,25	825	223	37,5	8	9,0
48	Tecelagem São Carlos S/A	201,7	7561,35	830	235	50	6	9,0
49	Tecumseh do Brasil Ltda	201,77	7560,57	830	110	16	20	9,6
50	Tecumseh do Brasil Ltda	202,09	7560,48	840	120	16	20	9,6
51	Tecumseh do Brasil Ltda	201,19	7566,94	850	250	60	7	12,6
52	Tecumseh do Brasil Ltda	201,6	7566,3	845	210	15	20	9,0
53	Tecumseh do Brasil Ltda	201,72	7566,35	845	242,9	30	20	18,0
54	Textil Cafi Ltda	203,71	7559,98	880	208,5	15	8	3,6
55	USP - Campus	201	7563,1	860	268,3	23		13,8
56	USP - Campus II de São Carlos	197,14	7564,28	850	320	60		36,0
57	Volkswagem do Brasil Ltda	204,7	7557,75	818	182	40	18	21,6
total								857,0

FONTE: DAEE - Araraquara

Os valores outorgados de direito de uso de água subterrânea para os poços do SAAE, que não incluem os poços nº 16, 18, 25 e 27, totalizam 1.425 mil m³/mês (1.979 m³/h). O valor total outorgado aos poços particulares de todos os aquíferos é de 931,5 mil m³/mês (1.293 m³/h), que adicionados às outorgas do SAAE atingem o total de 2.356 m³/mês

(3.273 m³/h), para um total de 127 poços com outorga de direito de uso da água.

Para possibilitar uma visualização da distribuição espacial das vazões outorgadas, foi elaborada a **Figura 14**, onde são apresentados, em planta, os gráficos individuais dos valores outorgados para cada poço, considerando os poços do SAAE e os particulares, onde se verifica que as distâncias entre os poços públicos e particulares de alta produção são, em geral superiores a 1.000 m. No entanto, para poços de menor vazão existe uma grande quantidade de poços particulares com direito de uso regularizado, que se encontram muito próximos entre si e próximos também de alguns poços utilizados para abastecimento público, criando situações potenciais de competição e de conflito pelo uso da água.

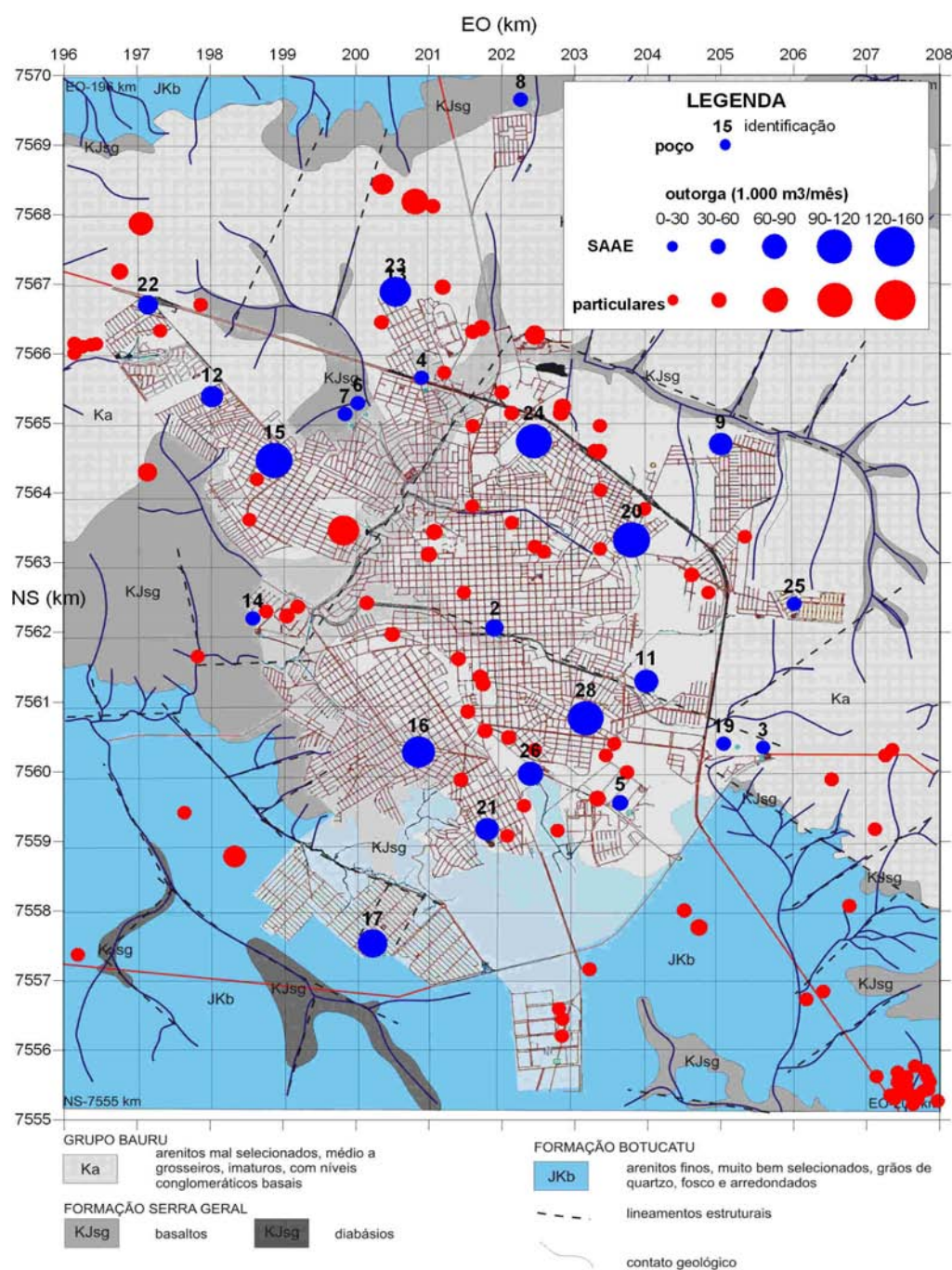


Figura 14: Planta com gráficos das vazões outorgadas de poços públicos e particulares da cidade de São Carlos

6.1.5. Balanço entre a disponibilidade e o consumo de água subterrânea na área

Segundo DAEE (1974), o primeiro estudo do potencial de água subterrânea, realizado na Região Administrativa 6 de Ribeirão Preto,

concluiu que a somatória do potencial de aproveitamento de todos os aquíferos presentes, incluindo o Guarani, seria de 3,8 bilhões de m³/ano, em uma área de 35.000 km². Esse resultado equivale a uma taxa de recarga de 109 mm/ano. Segundo AQUA BAVARIA GUARANI (2004), estudos recentes para quantificação da recarga do Aquífero Guarani, baseados em dados de isótopos naturais e utilizando o modelo de balanço hídrico REGIS concluíram que, na área de afloramento da Fm. Botucatu em Ribeirão Preto, a taxa de recarga varia entre 200 e 250 mm/ano.

Tendo em vista que na área da cidade de São Carlos existem áreas de afloramento da Fm. Botucatu e áreas onde esta se encontra recoberta por basalto, pode-se adotar um valor intermediário entre as duas estimativas de taxa de recarga, acima apresentadas, equivalente a 167 mm/ano, que resulta no seguinte balanço hídrico:

demanda

- poços do SAAE: 1.979 m³/h;
- poços de particulares: 1.293 m³/h;
- total: 3.273 m³/h

disponibilidade

- taxa de recarga: 167 mm/ano;
- área atual de captação (área urbana): 95 km²;
- disponibilidade total: 1.836 m³/h;

déficit atual: 1.437 m³/h

Os cálculos acima, embora tenham um caráter primário, indicam a possibilidade de que esteja ocorrendo a super-exploração dos aquíferos, que deverá ser mais bem investigada.

6.1.6. Análise da evolução do comportamento do aquífero

Com base nos dados disponíveis de nível estático, dos ensaios de bombeamento realizados após a construção dos poços e medidas mensais do programa de monitoramento, foi elaborado o gráfico da **Figura 15**. O gráfico ratifica a indicação de super-exploração dos aquíferos, mencionada no item anterior, evidenciando a ocorrência do rebaixamento do nível estático em todos os poços. Utilizando-se as equações das linhas de tendência (regressão linear) foram calculados os valores médios do nível piezométrico para dezembro de 2003, conforme **Tabela 10**.

Tabela 10: Nível piezométrico dos poços do SAAE em dezembro de 2003

nº do poço	nome	UTM EW	UTM NS	aquífero	nível piezométrico dezembro 2003 (m)
2	Antônio Fischer dos Santos	201,90	7.562,06	bas/G	737
5	Distrito Industrial MA	203,62	7.559,55	bas/G	784
8	Samambaia	202,26	7.569,65	G	763
9	Maria Stela Fagá	205,00	7.564,70	Gc	709
11	Azuville II	203,98	7.561,30	Gc	772
12	São Carlos III	198,03	7.565,38	Gc	716
14	Parque Faber	198,59	7.562,19	bas/G	714
16	Boa Vista	200,86	7.560,28	Gc	731
17	Cidade Aracy	200,23	7.557,53	Gc	708
19	Tramer	205,04	7.560,40	G	778
20	Vila Nery	203,78	7.563,32	Gc	736
21	Cruzeiro do Sul	201,80	7.559,17	G	756
22	Parque Fehr	197,15	7.566,70	G	720
23	Jockey Club II	200,54	7.566,89	Gc	727
24	Nova Estância	202,44	7.564,74	Gc	717
25	Douradinho	206,01	7.562,40	G	777
26	Núcleo Habitacional WLS	202,39	7.559,97	G	773
28	Vila Alpes	203,15	7.560,77	G	789

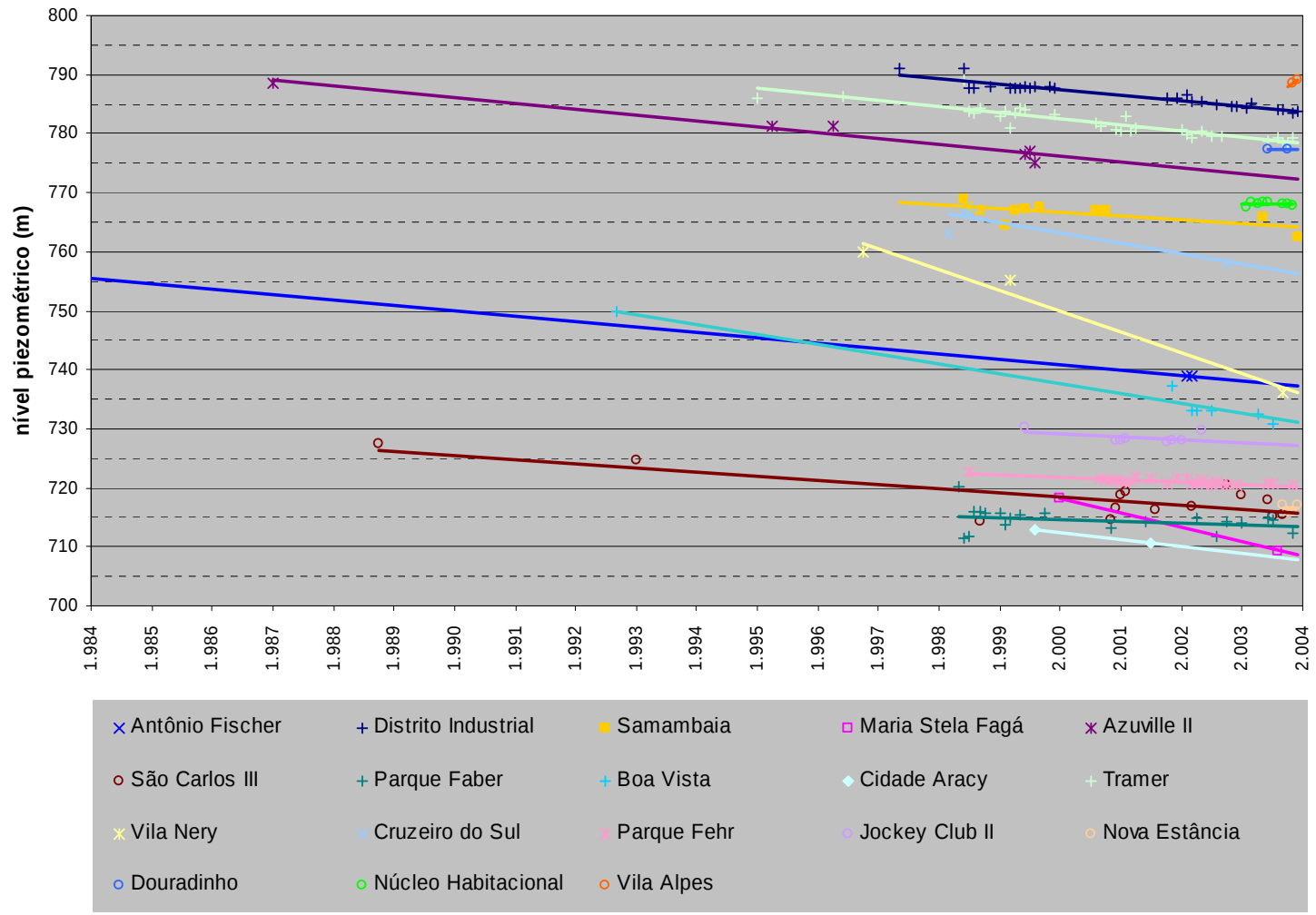


Figura 15: Gráfico da evolução do nível piezométrico dos poços do SAAE, nos últimos 20 anos

Os dados calculados de nível piezométrico foram utilizados para definir a superfície piezométrica (superfície de tendência), que consta do mapa hidrogeológico da **Figura 16**, onde são também representados: as direções e o sentido do fluxo subterrâneo, gráficos indicativos da produção mensal dos poços (círculos com diâmetro proporcional à produção de água dos poços) e o substrato geológico. A superfície piezométrica e os vetores de fluxo indicam que regionalmente a direção do fluxo da água no Aquífero Guarani se mantém no sentido SE-NW, como originalmente indicou SILVA (1983). No entanto, a exploração de água durante as duas últimas décadas gerou deformações na superfície original, como indicam, por exemplo, as depressões nos poços nº 9, 15 e 17.

Analisando-se em conjunto o gráfico da **Figura 15** e o mapa da **Figura 16**, verifica-se que existe um grupo de poços (nº 5, 11, 19, 21 e 28) em que o nível piezométrico estava originalmente em cotas acima de 770 m, localizado na porção SE da cidade e um segundo grupo de poços (nº 9, 12, 14, 22 e 23) com cotas do nível piezométrico abaixo de 730 m, localizados na área NW da cidade. O primeiro grupo representando uma importante área de recarga, onde pode ocorrer contato direto entre as formações Bauru – Botucatu, como ocorre em um poço nº 26. A grande diferença de cota piezométrica sugere a existência de algum tipo de barreira hidráulica entre essas duas áreas associada à presença de estruturas geológicas, em sub-superfície, conforme indicado na seção geológica vertical apresentada na **Figura 17**.

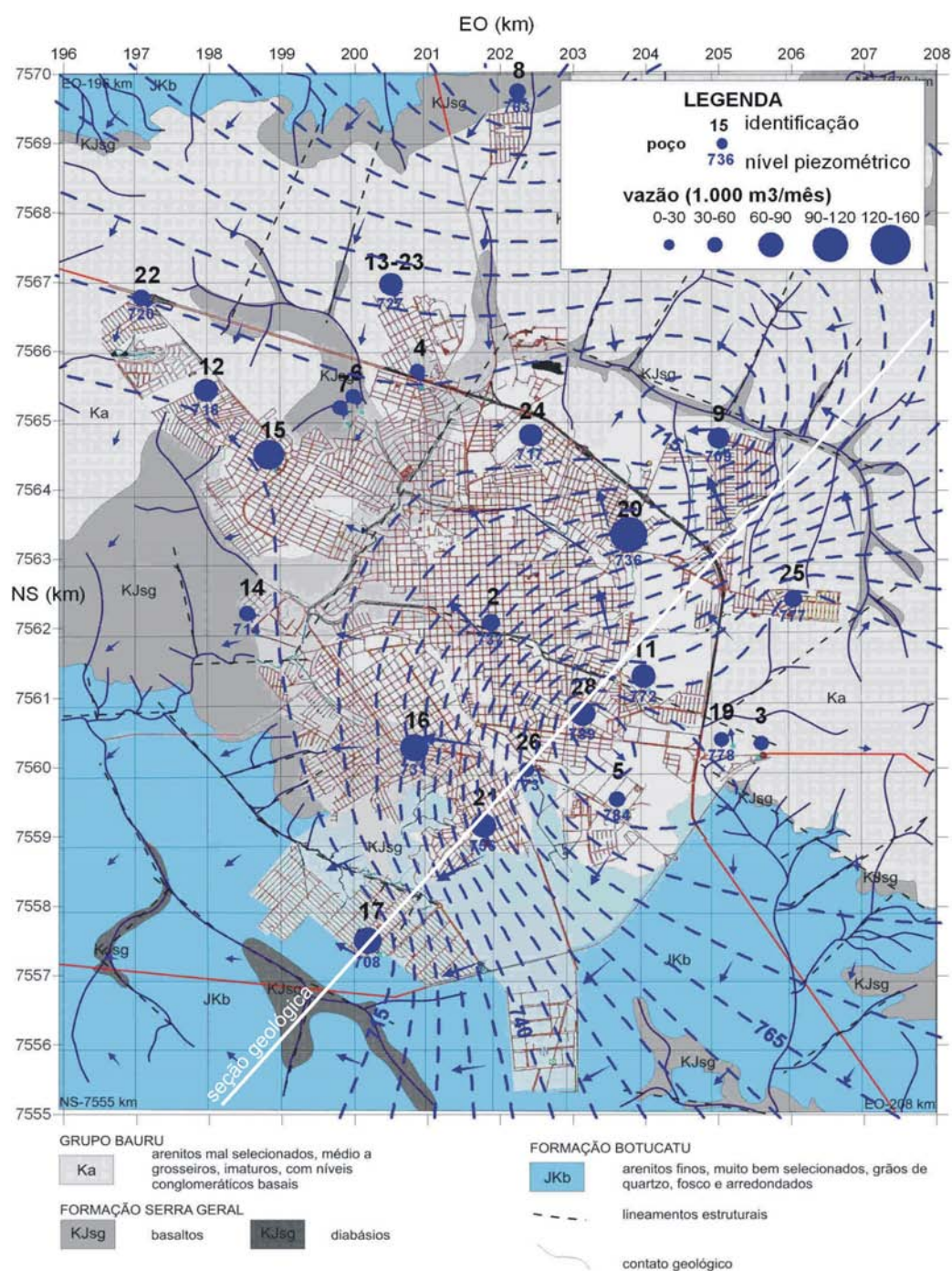


Figura 16: Mapa hidrogeológico com superfície piezométrica e direções de fluxo e gráficos de produção mensal dos poços do SAAE do Aquífero Guarani em 2003.

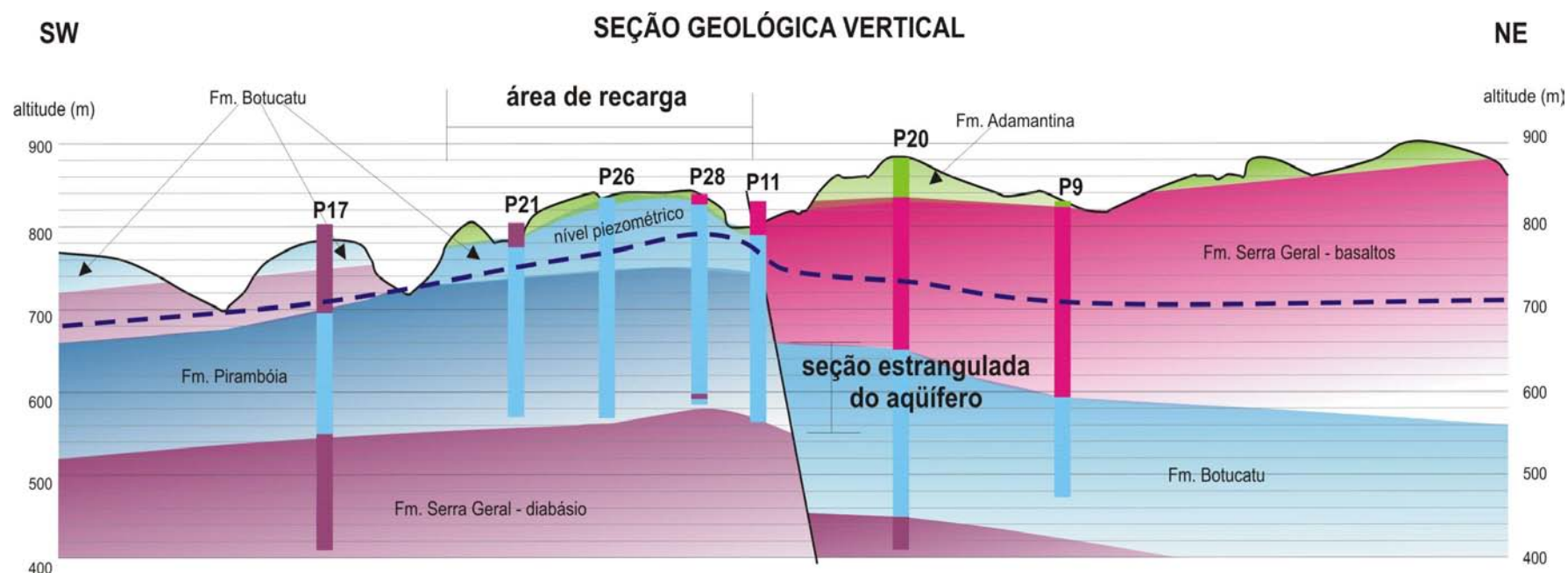


Figura 17: Seção geológica vertical na direção SW-NE, cuja localização é indicada na Figura 16, com indicação dos perfis dos poços, nível piezométrico, área de recarga e seção estrangulada do Aquífero Guarani.

6.1.7. Hidroquímica e qualidade da água

PFEIFFER & CHAUDHRY (1993) analisaram amostras da água do Aquífero Guarani em 12 poços da cidade de São Carlos, no entanto não fornecem dados de identificação e localização precisa de modo a permitir a correlação com os poços utilizados no presente trabalho. Foram realizados exames físicos e análises químicas para detecção dos principais cátions e ânions, e exames bacteriológicos.

Os resultados obtidos indicaram boas condições de qualidade da água para consumo humano, com baixo teor de sais dissolvidos e pequenas variações de pH, próximo ao neutro. Com exceção dos teores de cálcio, que são muito inferiores aos valores apresentados por SILVA (1983), relativos a 2 poços da cidade de São Carlos, que apresentaram 5 e 6 mg/L, os demais resultados de maneira geral são compatíveis entre os dois trabalhos.

Diversos parâmetros analisados indicaram tratar-se de uma área de recarga do Aquífero Guarani, seja por infiltração direta na área de afloramento da Formação Botucatu, seja pela percolação indireta através das formações Bauru e Serra Geral, com indicações claras da direção e sentido do fluxo subterrâneo de SE para NW, conforme resumo apresentado na **Tabela 9**.

O monitoramento da qualidade da água dos poços efetuado pelo SAAE atende às exigências da Vigilância Sanitária e consiste apenas da determinação de pH, alcalinidade, turbidez, cor e teor de fluoreto que não apresentam interesse para o presente trabalho.

Tabela 11: Resultados de análises químicas de água subterrânea em poços da cidade de São Carlos

parâmetro	unidade	valores		padrão de variação
		mínimo	máximo	
pH		5,3	6,7	mais ácido na área de afloramento
cond.elétrica	μS/cm	9,2	89	baixos no afloramento
TSD	mg/L	13,6	120	baixos no afloramento
dureza	mg/L CaCO ₃	1,27	56	aumento de SE para NW
potássio	mg/L	0,13	4,75	aumento de SE para NW
sódio	mg/L	0,2	4,9	aumento de SE para NW
cálcio	mg/L	0,03	0,95	aumento de SE para NW
magnésio	mg/L	0,05	3,4	aumento de SE para NW
bicarbonato	mg/L CaCO ₃	4,8	48	aumento de SE para NW
cloreto		1,4	2,81	apenas 3 amostras
sulfato				não detectado
manganês		<0,001	0,007	
ferro		<0,001	0,35	diminui de SE para NW
fluor		0,207	0,22	
sílica		4,23	19,46	aumento de SE para NW
nitrato		0,03	4,47	indício de contaminação em 2 poços

FONTE: Pfeiffer e Chaudhry, 1993

A baixa salinidade aliada à presença de CO₂ dissolvido e o pH ligeiramente ácido conferem um caráter ligeiramente corrosivo à água que, em combinação com a ação de bactérias pode danificar os tubos e filtros metálicos que revestem os poços e que a possibilidade de formação de depósitos minerais, no interior dos poços, é pequena.

6.2. Análise da performance dos poços

Com exceção dos poços desativados, abandonados e de construção recente (com curtos períodos de operação), os dados de monitoramento dos demais poços, permitiram a elaboração de gráficos de nível estático, nível dinâmico e vazão, e a análise da evolução da performance dos poços, cujos resultados são apresentados e comentados a seguir.

O poço nº 02 – Antônio Fisher dos Santos é o poço mais antigo em operação, mas dispõe de registros de dados operacionais apenas durante o ano de 1994, dois meses de 1997 e nos últimos 3 anos, conforme consta do gráfico da **Figura 18**, que mostra queda constante do nível da água. A linha de tendência baseada nas poucas medidas de nível estático, permite inferir uma queda total do nível da água, nesse local, de 32 m (de 40 m de profundidade, em 1969, para 72 m de profundidade, em 2004). A vazão original que era de 100 m³/h, foi, provavelmente, mantida nessa ordem de grandeza, até o final de 1997, e que posteriormente houve uma alteração da condição operacional (em data não registrada) com redução da vazão bombeada para 48 m³/h (aproximadamente metade da vazão original). Com a redução da vazão, é provável que o nível dinâmico tenha subido durante um certo período, mas, mesmo assim os dados de medidas de nível dinâmico também indicam queda em relação ao nível inicial, a qual atinge 19 m (de 58 m de profundidade, em 1969, para 72 m de profundidade, em 2003).

As quedas observadas de nível da água (estático e dinâmico) são interpretadas como resultantes do esgotamento progressivo do aquífero e a tendência convergente das linhas de regressão linear dos dados de nível estático e dinâmico é considerada consequência da redução da vazão.

Devido às deficiências construtivas e antiguidade, esse poço tem apresentado produção de água turva e a administração do SAAE tem planos de desativá-lo em futuro próximo.

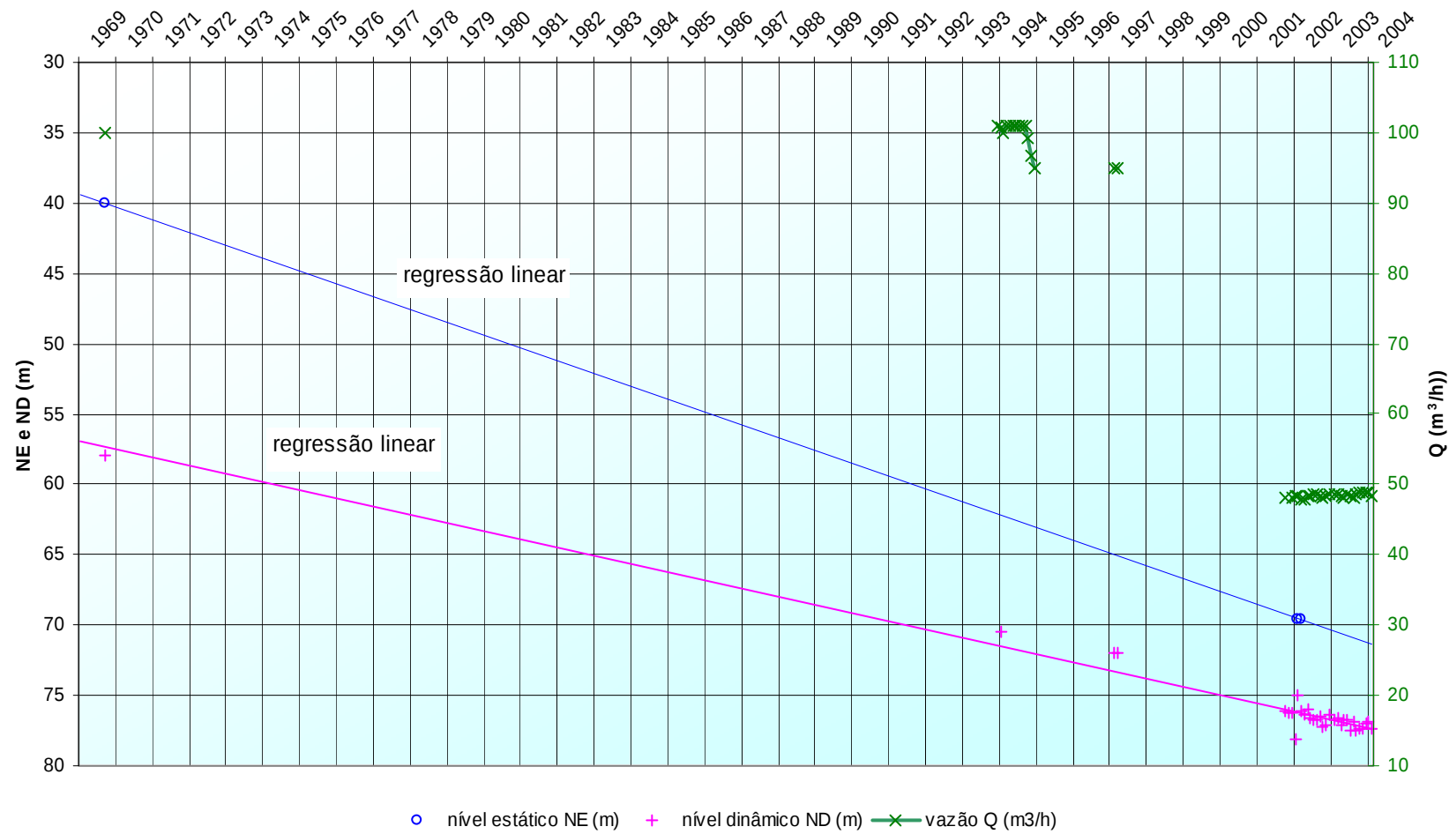


Figura 18: Gráfico de evolução da performance do poço nº 02 – Antonio Fisher dos Santos

O poço nº 05 – Distrito Industrial foi construído em 1980 e não foi possível recuperar as informações de nível da água dessa época. Os dados disponíveis se restringem aos relatórios de monitoramento, elaborados a partir de 1991, e apresentados no gráfico da **Figura 19**. O gráfico evidencia a queda constante do nível da água, que no caso do nível estático equivale a 7,4 m nos últimos 7 anos. A linha de tendência do nível estático, permite inferir uma queda total do nível da água, nesse local, de 22 m (de 67 m de profundidade, em 1980, para 89 m de profundidade, em 2003).

A vazão bombeada variou desde de 42 m³/h, a cerca de 20 m³/h em curtos períodos (em 1997 e 1999) e nas últimas medidas disponíveis voltou a ser aumentada para 39 m³/h. O nível dinâmico também apresenta queda constante, porém com indícios de ligeira recuperação nos últimos anos devida, provavelmente à redução da vazão.

As quedas observadas de nível da água (estático e dinâmico) são interpretadas como resultantes do esgotamento progressivo do aquífero e a tendência convergente das linhas de regressão linear dos dados de nível estático e dinâmico é considerada consequência da redução da vazão.

Devido às deficiências construtivas, esse poço tem apresentado água “barrenta” e a administração do SAAE tem planos de desativá-lo.

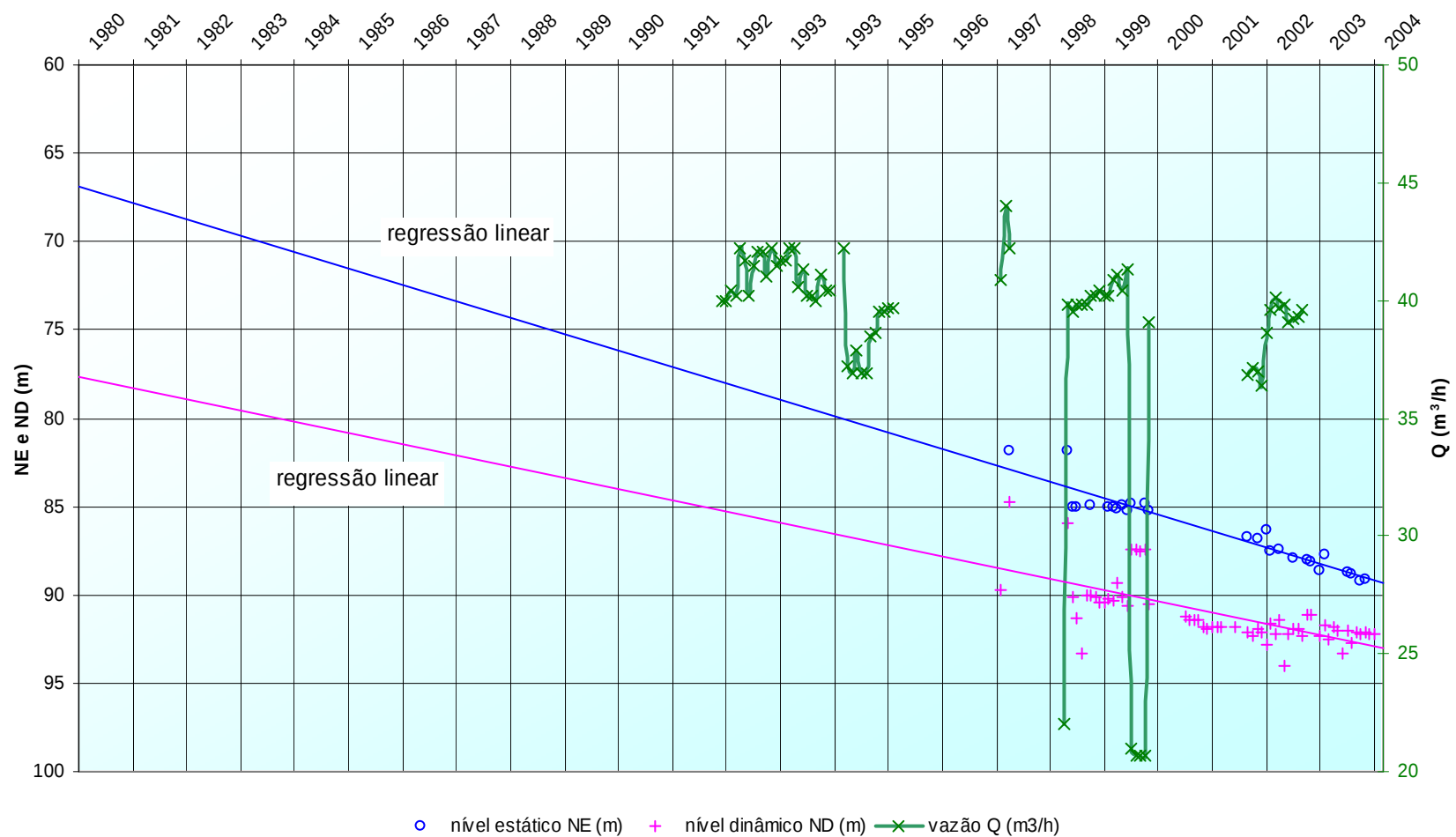


Figura 19: Gráfico de evolução da performance do poço nº 05 – Distrito Industrial

O gráfico do poço nº 08 – Samambaia (**Figura 20**) apresenta um número muito restrito de medidas de nível estático, as quais apresentam oscilação que, provavelmente, se deve ao nível da água não estabilizado. A linha de tendência do nível estático mostra uma ligeira queda de apenas 3 m em 21 anos de operação.

Os dados de medidas de vazão se restringem aos períodos de 1991-1994, 1998-1999 e 2001-2002 (apenas 4 meses), com grandes variações e um aumento nesses 3 períodos. As medidas de nível dinâmico são mais freqüentes e indicam queda gradual mais acentuada que a do nível estático, principalmente até início de 2003, provavelmente devido aos aumentos de vazão ocorridos até essa época e no último ano uma ligeira subida, provavelmente decorrente de redução da vazão não registrada.

As quedas observadas de nível da água (estático e dinâmico) são interpretadas como resultantes do esgotamento progressivo do aquífero e a tendência mais acentuada da linha de regressão linear do nível dinâmico é considerada conseqüência do aumento da vazão.

Devido às deficiências construtivas e baixa produção, a administração do SAAE tem planos de desativá-lo.

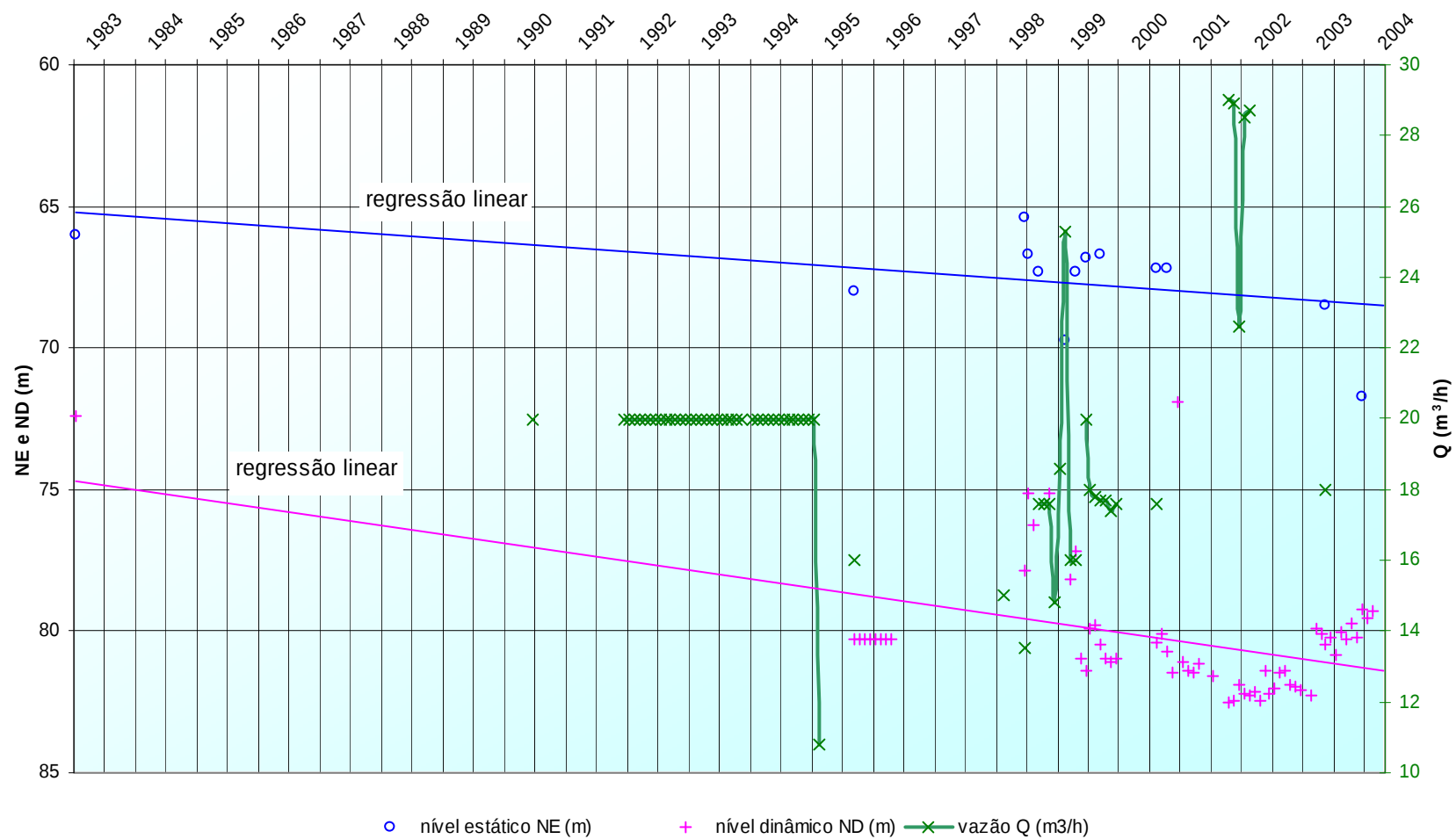


Figura 20: Gráfico de evolução da performance do poço nº 08 - Samambaia

O relatório da construção informa que não foi efetuado teste de bombeamento no poço nº 09 – Maria Stella Fagá. No período de 1986 a 2000, não foram efetuadas medidas de nível da água, devido à falta de condições (não tinha acesso para o aparelho medidor). A partir de agosto de 2000, os relatórios de monitoramento passaram a indicar as medidas mensais de nível dinâmico, e não são informados os motivos que levaram ao registro de apenas 3 medidas de nível estático, durante trocas da bomba.

O gráfico do poço nº 09 – Maria Stella Fagá (**Figura 21**), evidencia a queda de 10 m do nível estático nos últimos 4 anos. Os dados de vazão e nível dinâmico dos últimos dois anos, indicam a redução lenta da vazão explorada, acompanhada de elevação do nível dinâmico.

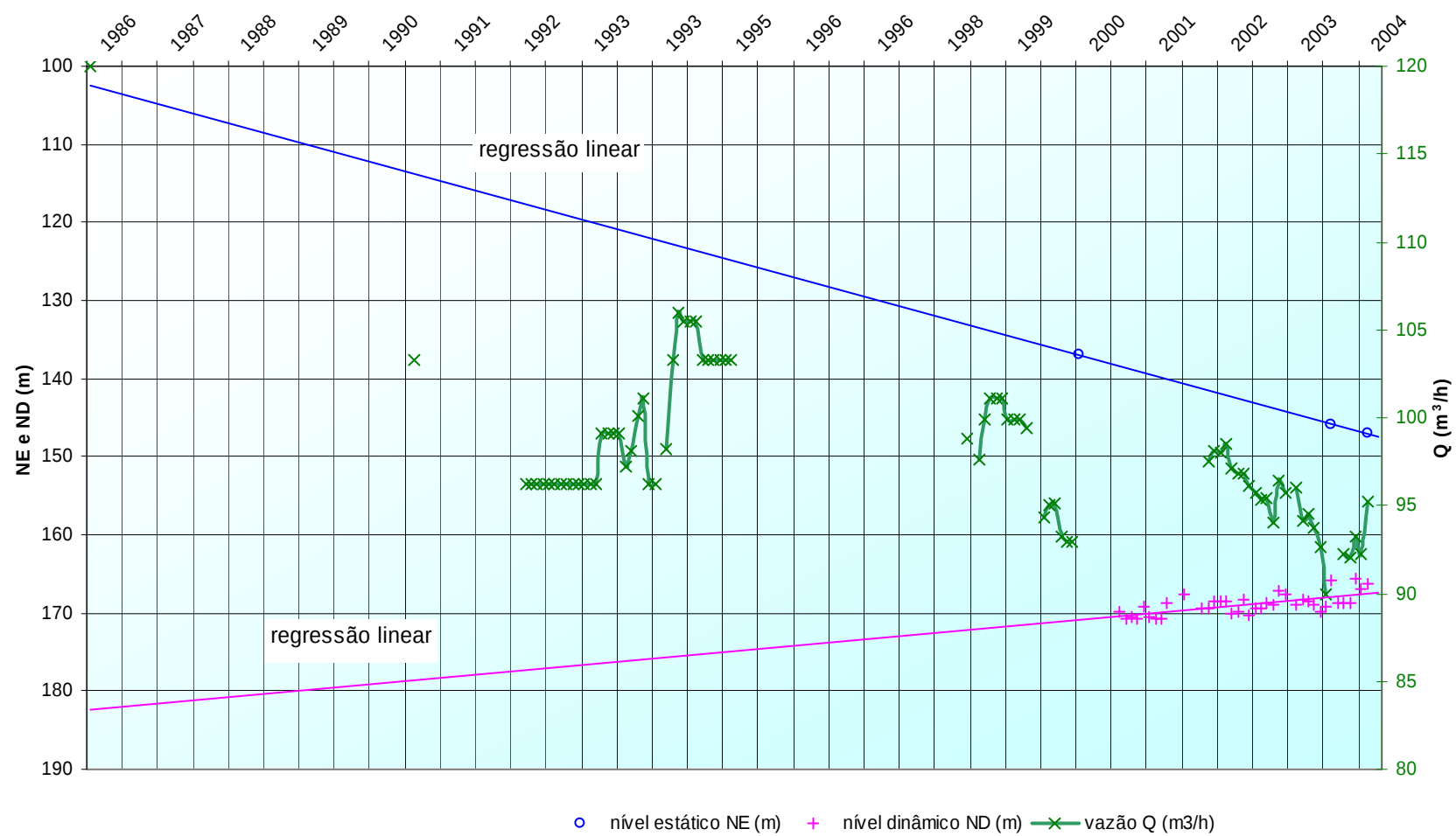


Figura 21: Gráfico de evolução da performance do poço nº 09 – Maria Stella Fagá

O gráfico do poço nº 11 – Azulville II (**Figura 22**) evidencia clara tendência de queda dos níveis da água. Em 17 anos de operação o estático sofreu queda de 13 m e o dinâmico, 20 m. No período 1991-2004, a vazão bombeada teve uma redução gradual, de 140 para 115 m³/h e mesmo assim houve a queda mais acentuada do nível dinâmico o que indica a perda progressiva de performance hidráulica do poço. Os valores calculados de vazão específica (vazão por unidade de rebaixamento) indicam redução de 26% (de 3,34 para 2,47 m³/h/m).

As quedas observadas de nível da água (estático e dinâmico) são interpretadas como evidências do esgotamento progressivo do aquífero e a tendência mais acentuada de queda do nível dinâmico, mesmo tendo havido redução da vazão bombeada, é considerada indicação de perda progressiva de performance hidráulica do poço.

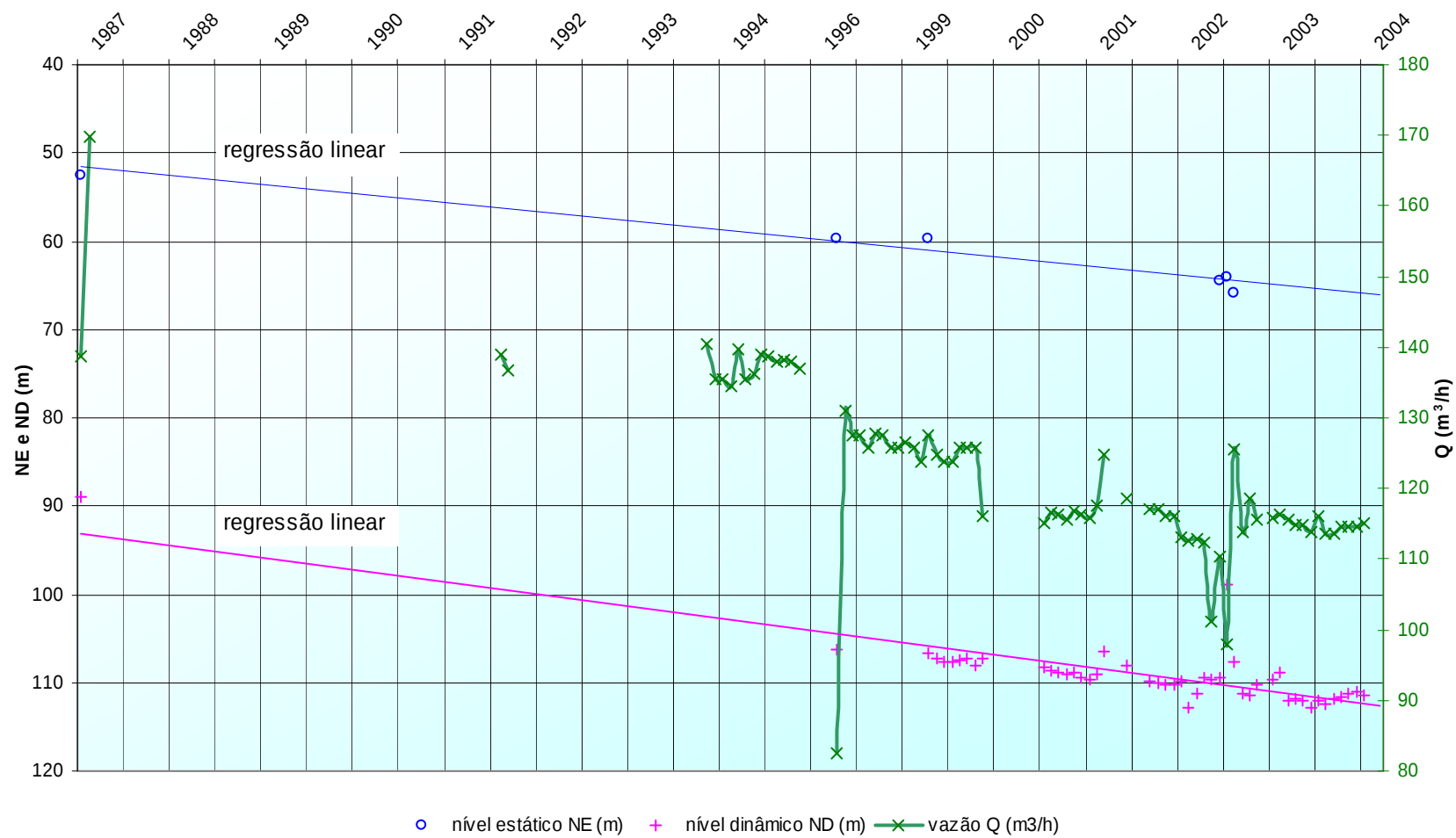


Figura 22: Gráfico de evolução da performance do poço nº 11 – Azulville II

Segundo o relatório da construção do poço nº 12 – São Carlos III, a sua capacidade de produção original era de 165 m³/h. No entanto, em 1991, ocorreu um acidente, durante retirada da bomba, e essa ficou aprisionada na base da câmara de bombeamento, a 254 m de profundidade. Como as tentativas de pescaria realizadas na época não tiveram sucesso, foi instalada outra bomba e o poço foi mantido em operação com vazão de 100 m³/h. Em 1998 foi realizada operação de manutenção do poço, quando foi obtido êxito na pescaria da bomba, possibilitando a reconstituição da capacidade de produção do poço. O valor original de vazão específica (vazão por unidade de rebaixamento) era de 5,5 m³/h/m, com a queda da bomba, em 1991, foi reduzido a 3,7 m³/h/m e após a manutenção passou a ser superior a 6 m³/h/m.

O gráfico do poço nº 12 – São Carlos III (**Figura 23**), evidencia a queda do nível estático de 13 m, no período de operação de 15 anos. Até 1998, o nível dinâmico aparentemente acompanhou a queda do nível estático e a seguir passou a apresentar tendência de elevação devido à melhoria da performance hidráulica do poço obtida com a pescaria da bomba (acima mencionada). A vazão sofre oscilações e mostra redução progressiva após cada troca de bomba, até 2003, quando a bomba foi retirada e reinstalada a maior profundidade (20 m a mais), possibilitando aumento da vazão.

A queda observada do nível estático é interpretada como resultante do esgotamento progressivo do aquífero e a elevação do nível dinâmico como consequência de melhoria da performance hidráulica após serviço de manutenção do poço.

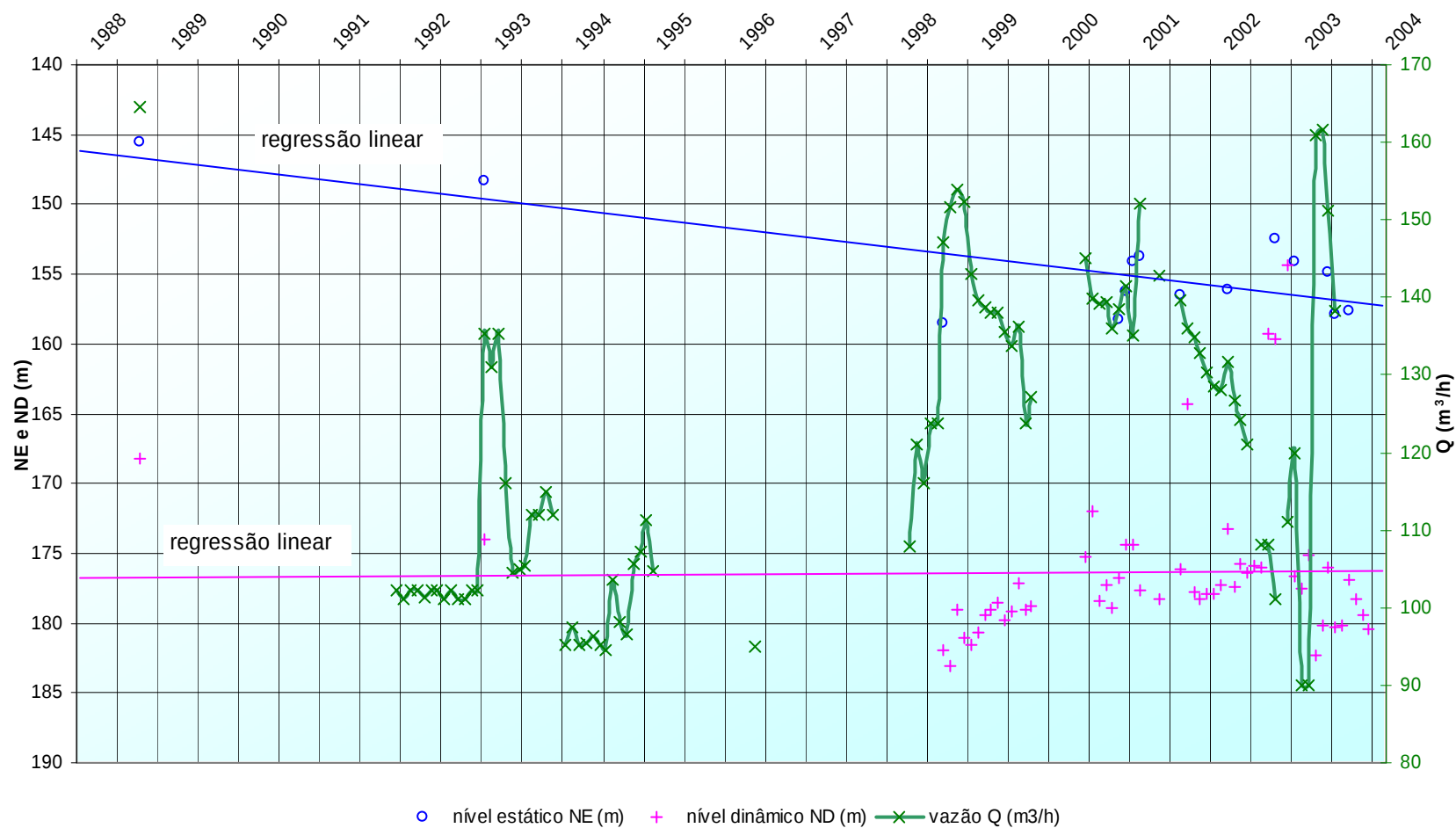


Figura 23: Gráfico de evolução da performance do poço nº 12 – São Carlos III

O gráfico do poço nº 14 – Parque Faber (**Figura 24**), evidencia clara tendência de queda dos níveis da água. Em 13 anos, a queda do nível estático foi de 13 m. Aparentemente a tendência de queda do nível dinâmico é paralela à do nível estático. A vazão apresenta oscilações e mostra redução progressiva após as substituições e manutenções da bomba. Desta forma, a redução progressiva da vazão indica que o poço apresentou, concomitantemente, alguma perda de performance, pois não houve elevação do nível dinâmico.

As quedas observadas de nível da água (estático e dinâmico) são interpretadas como evidências do esgotamento progressivo do aquífero e a redução da vazão sem elevação correspondente do nível dinâmico indica perda progressiva de performance hidráulica do poço.

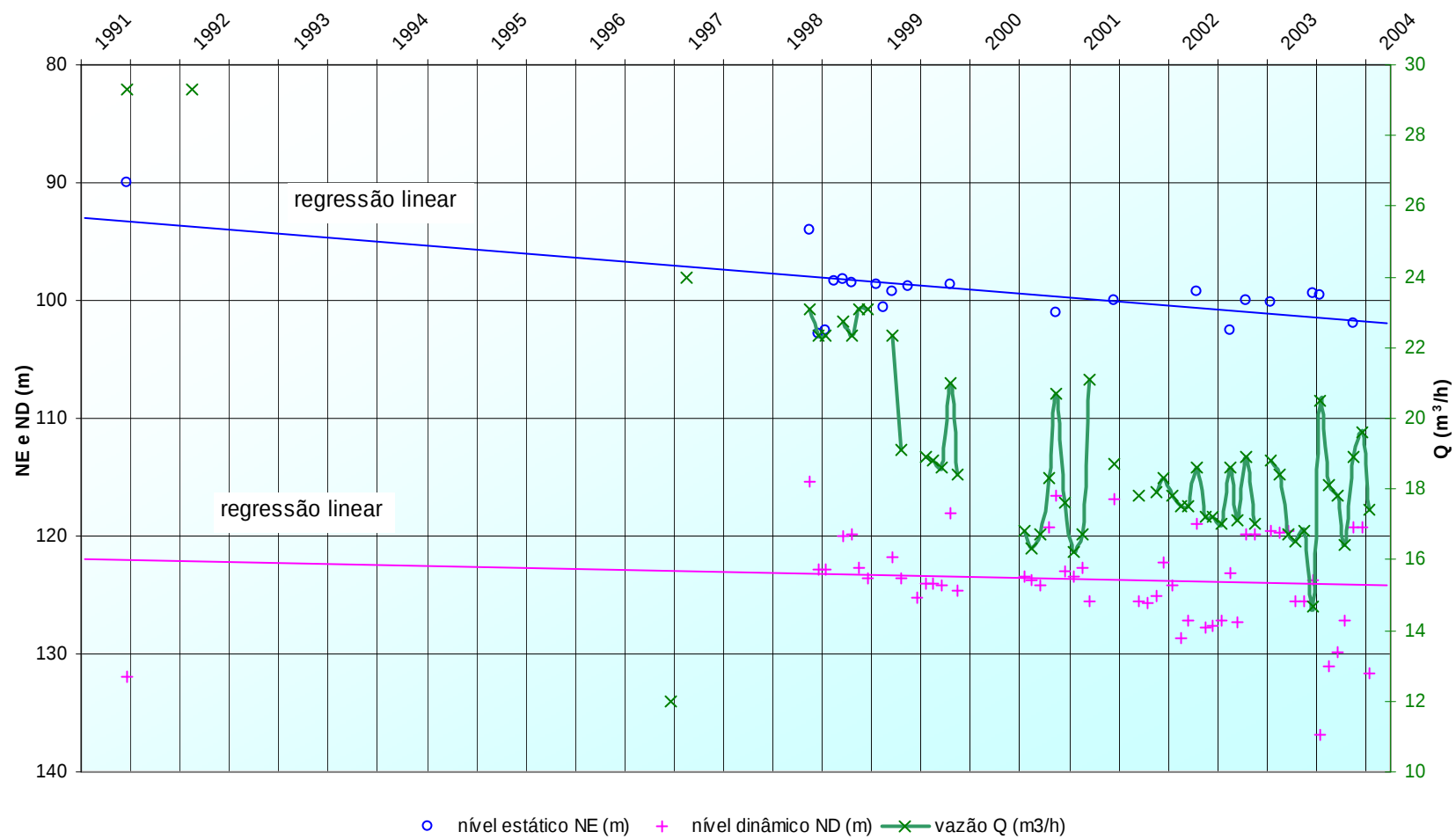


Figura 24: Gráfico de evolução da performance do poço nº 14 – Parque Faber

O poço nº 15 – Santa Felícia não dispõe de medidas de nível da água devido à existência de obstrução do tubo guia para acesso do medidor de nível da água, estando disponíveis apenas os valores obtidos em teste de bombeamento que consta do relatório de construção do poço. Os relatórios de monitoramento apresentam apenas os dados de vazão os quais mostram redução de 308 para 269 m³/h, entre 1999 e 2004 (**Figura 25**).

A redução da vazão, deve ser, ao menos em parte, decorrente da perda de performance da própria bomba, mas, provavelmente, se deve também ao rebaixamento progressivo do nível da água e perda de performance do poço. A confirmação dessas hipóteses não podem ser efetivada enquanto não forem feitas medidas sistemáticas de nível da água.

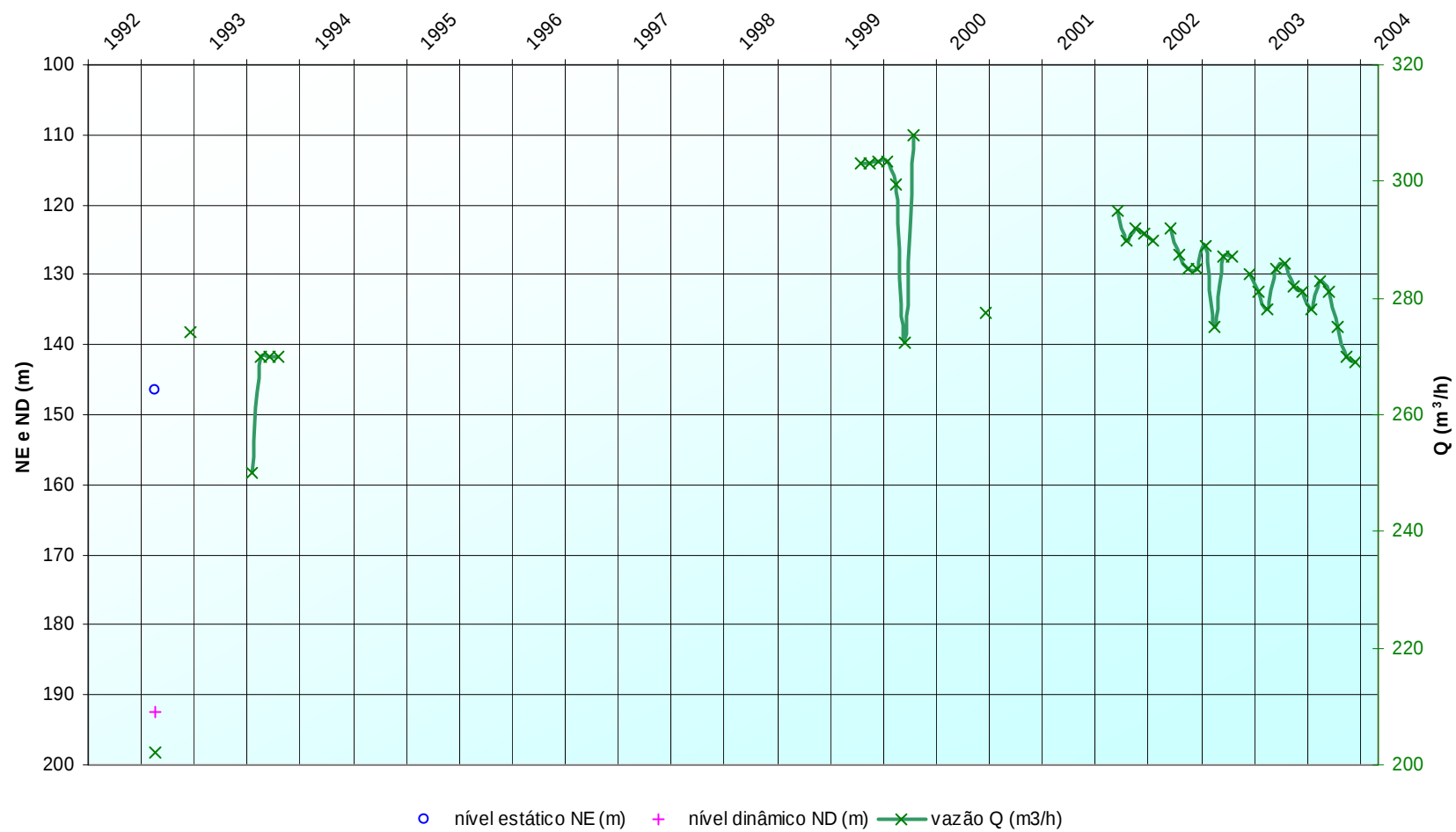


Figura 25: Gráfico de evolução da performance do poço nº 15 – Santa Felícia

O poço nº 16 – Boa Vista apresentou produção de areia e pré-filtro devido à ruptura de filtros da câmara de bombeamento, que, segundo relatórios técnicos baseados em perfilagem ótica, foi provocada pelo atrito com os flanges da coluna edutora⁴ da bomba de eixo prolongado. A recuperação do poço, efetuada em 2001, foi efetuada com 225 m de tubos de 10” instalados no interior da câmara de bombeamento, operação essa usualmente denominada de “reencamisamento”.

A redução do diâmetro útil da câmara de bombeamento e o isolamento dos filtros da câmara de bombeamento restringiram a capacidade de produção do poço, que desde então passou a ser operado com bomba submersa.

O gráfico do poço nº 16 – Boa Vista (**Figura 26**), evidencia a alteração das condições operacionais, ocorridas em 2001, e mostra queda do nível estático de 19 m, em 12 anos de operação. O nível dinâmico aparentemente acompanha essa queda porém, nos últimos dois anos, apresenta ciclos de rebaixamento e elevação, sincronizados com aumentos e reduções da vazão, respectivamente.

A queda do nível estático é interpretada como evidência do esgotamento progressivo do aquífero e a redução da vazão se deveu às reduções da capacidade e da perda de performance hidráulica do poço, decorrentes do “reencamisamento”.

⁴ O termo “coluna edutora” é derivado do inglês “eductor pipe” e no caso de bombas de eixo prolongado contem, no seu interior a coluna de eixos que acionam o bombeador.

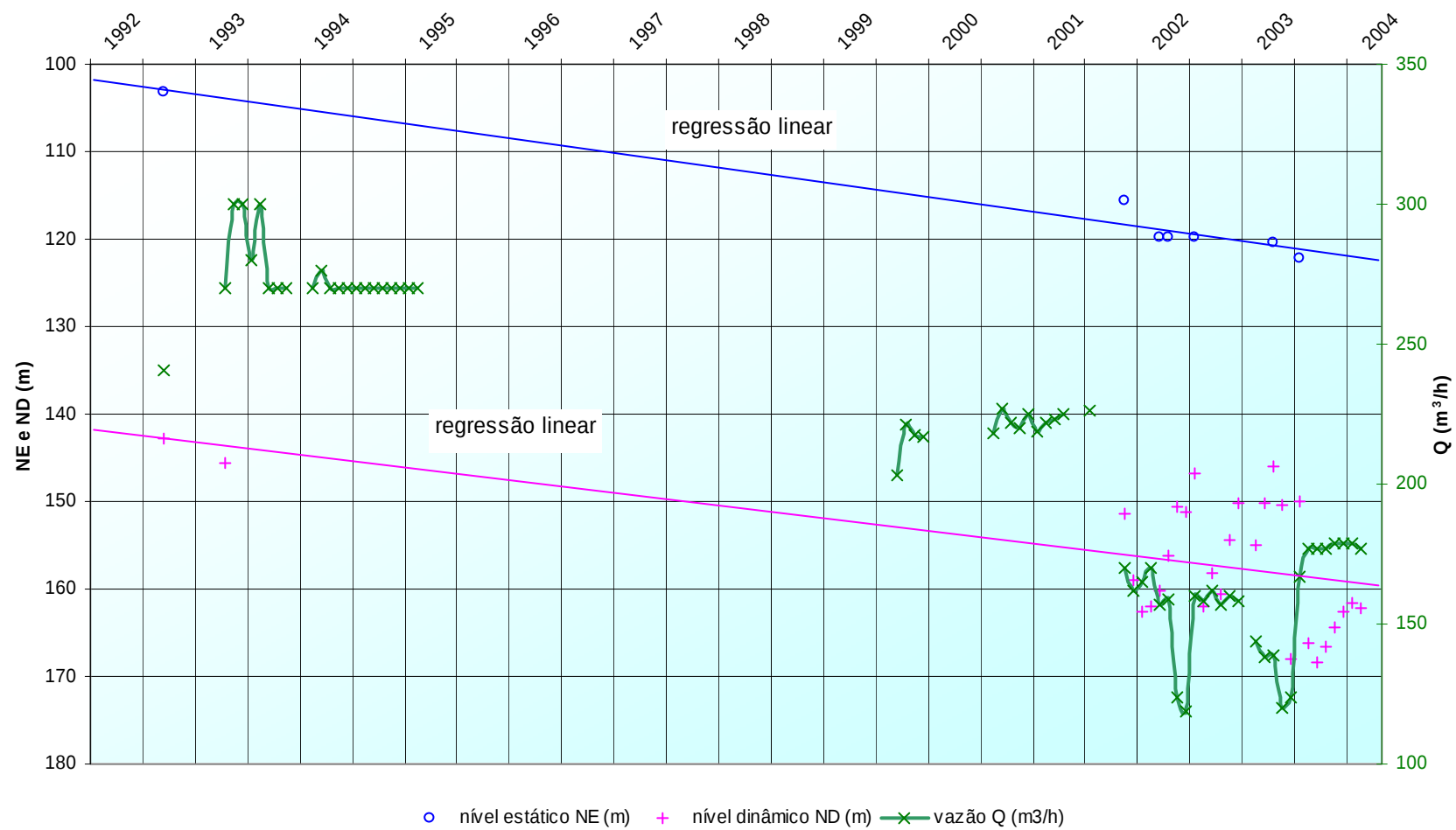


Figura 26: Gráfico de evolução da performance do poço nº 16 – Boa Vista

O poço nº 17 – Cidade Aracy foi construído e operado em regime de sub concessão até novembro de 2003 e desde 2001 o SAAE tem feito o monitoramento.

O gráfico do poço nº 17 – Cidade Aracy (**Figura 27**), embora com poucas medidas disponíveis, mostra tendência de queda de nível estático de 32 m, no período de operação de 10 anos.

Apesar de algumas oscilações a vazão mantém-se praticamente a mesma do início da operação (180 m³/h). O nível dinâmico não tem sido medido por se encontrar abaixo da base do tubo guia de medida de nível.

Os poucos dados operacionais e de monitoramento disponíveis não permitem uma avaliação das condições desse poço.

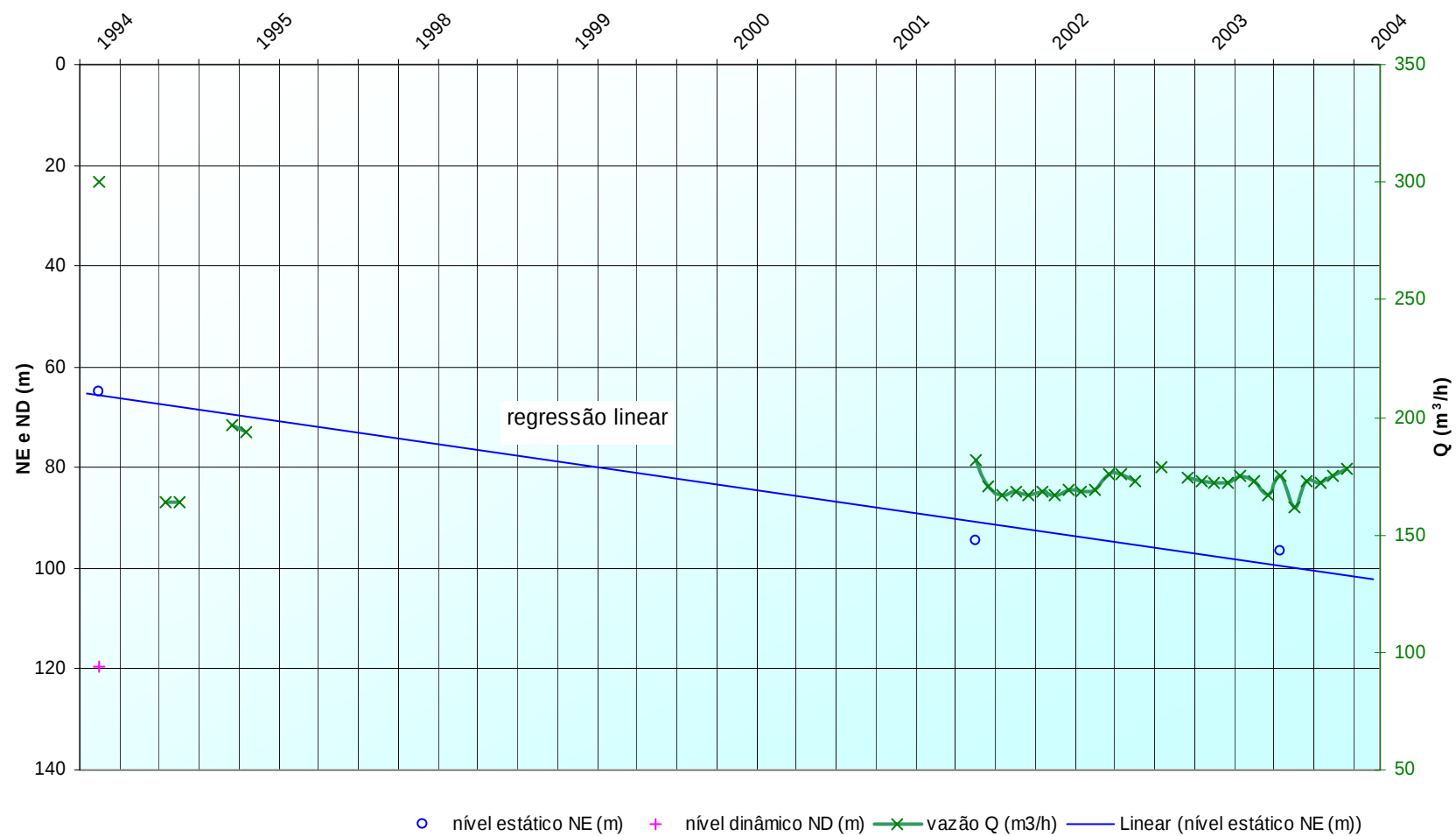


Figura 27: Gráfico de evolução da performance do poço nº 17 – Cidade Aracy

O poço nº 18 – Santa Eudóxia não dispõe de dados de monitoramento do nível estático devido ao horário de visita para realização de medidas coincidir com período de funcionamento. Porém, a estabilidade dos dados de nível dinâmico e de vazão, permite deduzir que não está ocorrendo queda do nível estático (**Figura 28**).

A vazão baixa ($30 \text{ m}^3/\text{h}$) e a localização afastada do centro da cidade asseguram boas condições de sustentabilidade da exploração de água nesse poço.

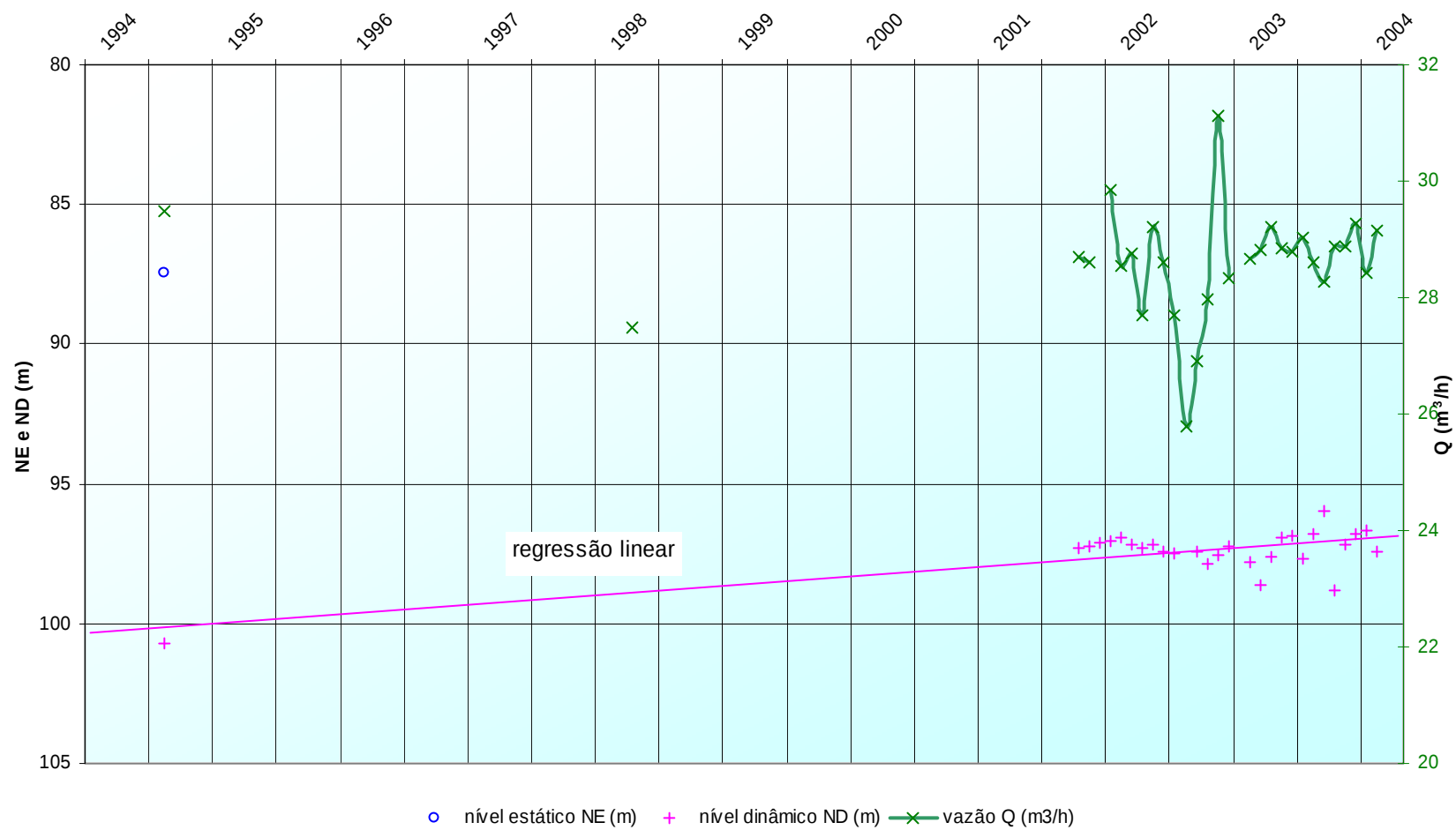


Figura 28: Gráfico de evolução da performance do poço nº 18 – Santa Eudóxia

O poço nº 19 – Tramer foi construído, em 1995, contratado por empresa privada, e destinado ao abastecimento industrial. Desde 1998, integra o sistema público de abastecimento, com operação pelo SAAE, em regime de locação. Os dados do teste de bombeamento que constam do relatório de construção do poço indicam que o valor inicial da vazão específica (vazão por unidade de rebaixamento) era de 1,6 m³/h/m.

O gráfico do poço nº 19 – Tramer (**Figura 29**) mostra queda do nível estático de 10 m, em 9 anos de operação e ligeira queda da vazão. Os dados de nível dinâmico e vazão indicam que o poço teve melhoria de performance hidráulica, pois sua vazão específica evoluiu de 1,6 para quase 5,0 m³/h/m.

A queda do nível estático é interpretada como evidência do esgotamento progressivo do aquífero e o aumento da capacidade específica como decorrência do desenvolvimento natural e gradual do poço durante a operação.

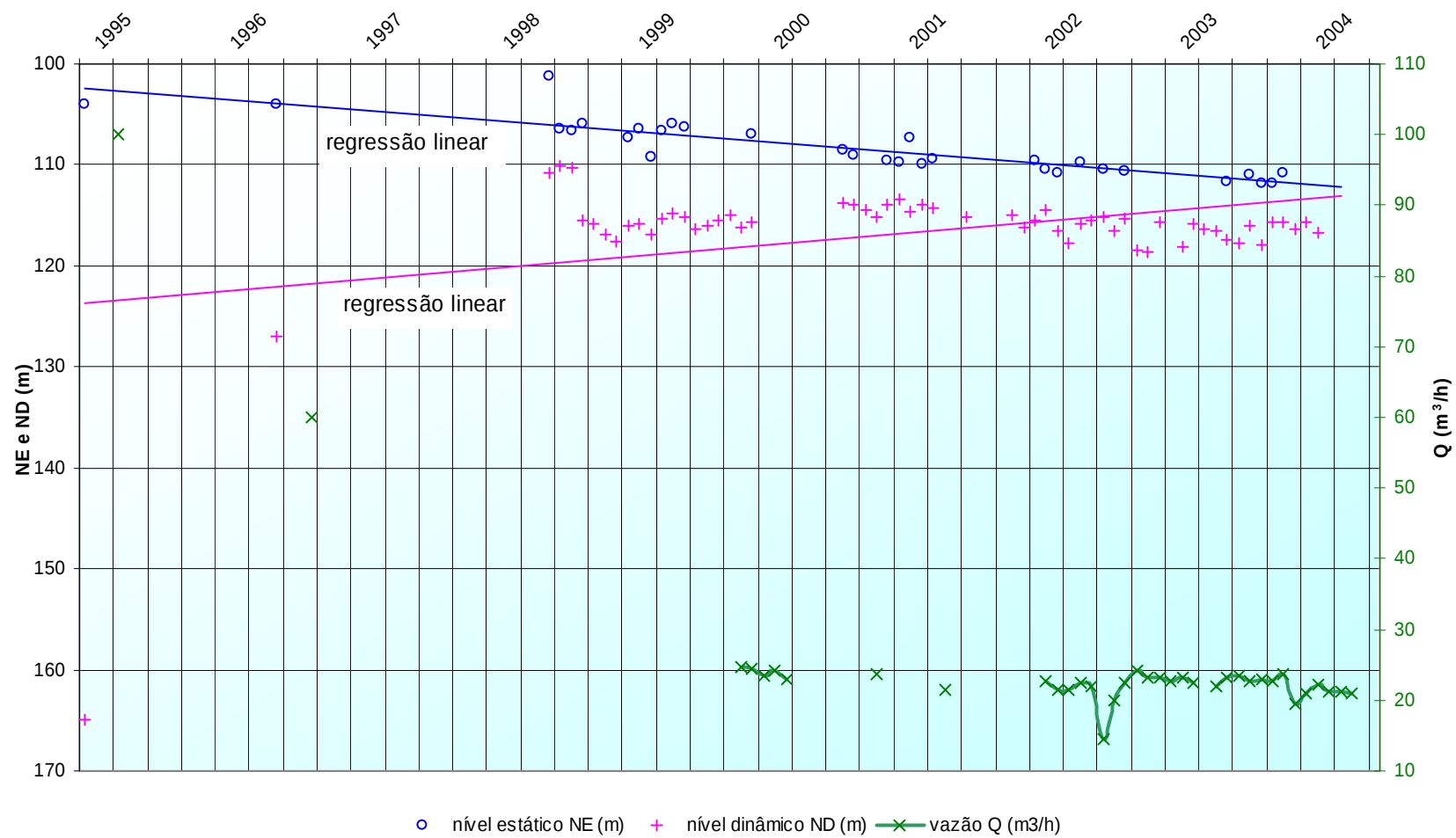


Figura 29: Gráfico de evolução da performance do poço nº 19 - Tramer

O gráfico do poço nº 20 – Vila Nery (**Figura 30**) tem poucas medidas de nível da água devido à existência de obstrução do tubo guia para acesso do medidor de nível da água, que, mesmo assim, evidenciam tendência acentuada de queda dos níveis da água, pois em 7,5 anos, a queda do nível estático foi de 23,7 m. Aparentemente, a tendência de queda do nível dinâmico é paralela à do nível estático. Como a vazão apresenta redução progressiva, de 320 para 290 m³/h, deve estar ocorrendo, concomitantemente, a perda de performance do poço, ou então, deveria ter ocorrido elevação do nível dinâmico.

As quedas observadas de nível da água (estático e dinâmico) são interpretadas como evidências do esgotamento progressivo do aquífero e a redução da vazão sem elevação correspondente do nível dinâmico indica perda progressiva de performance hidráulica do poço.

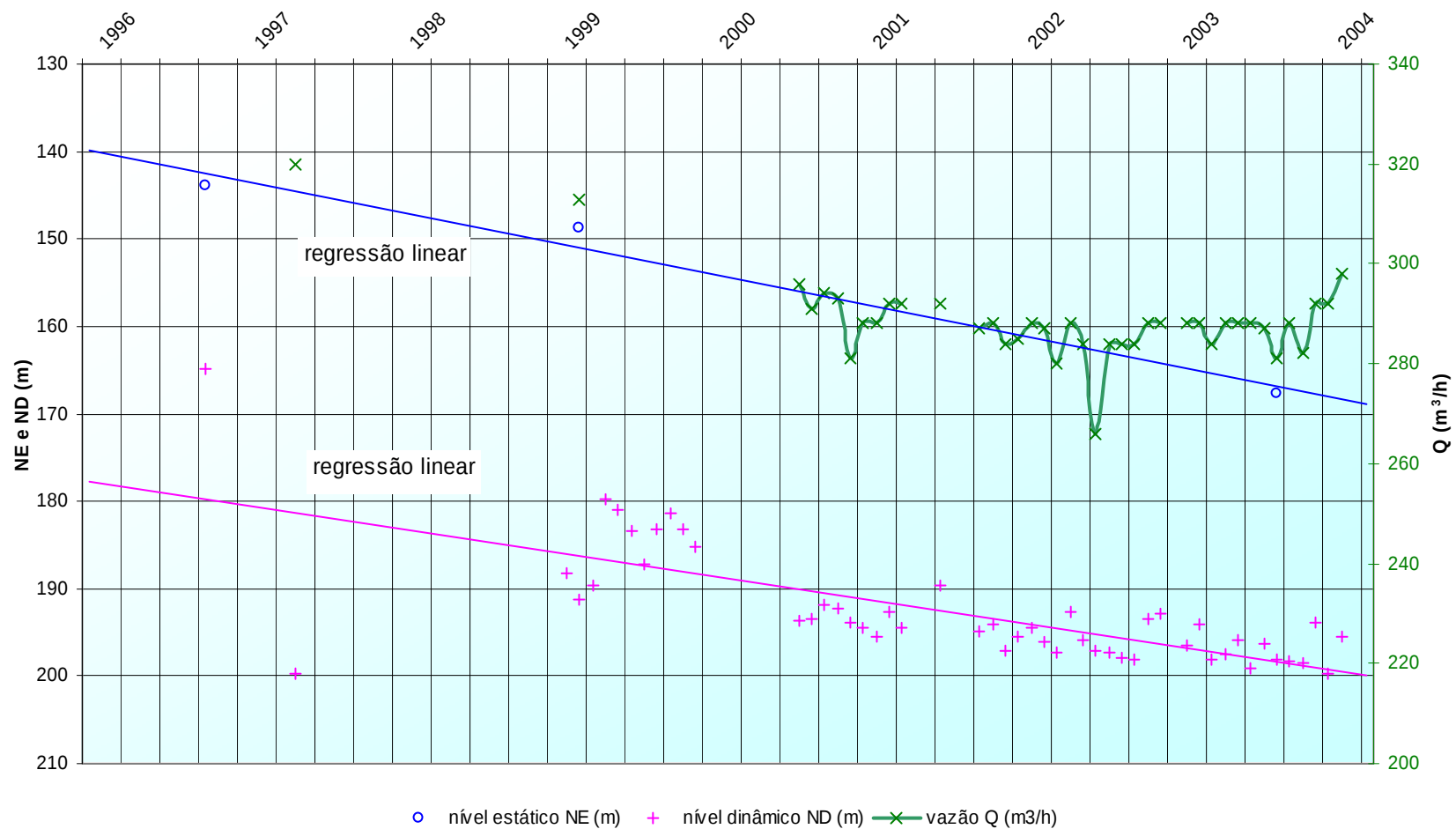


Figura 30: Gráfico de evolução da performance do poço nº 20 – Vila Nery

Os dados do teste de bombeamento que constam do relatório de construção do poço nº 19 – Cruzeiro do Sul indicam que o valor inicial da vazão específica (vazão por unidade de rebaixamento) era de $1,8 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

O gráfico do poço nº 21 – Cruzeiro do Sul (**Figura 31**) mostra queda acentuada do nível estático de 20 m, em 6 anos de operação. A vazão sofreu grandes variações em função de alteração de condições operacionais e ligeiro aumento de 120 para $130 \text{ m}^3/\text{h}$. Os dados de nível dinâmico e vazão indicam que o poço teve melhoria de performance hidráulica, pois sua vazão específica evoluiu de 1,8 para quase $4,0 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

A queda do nível estático é interpretada como evidência do esgotamento progressivo do aquífero e o aumento da capacidade específica como decorrência do desenvolvimento natural e gradual do poço durante a operação.

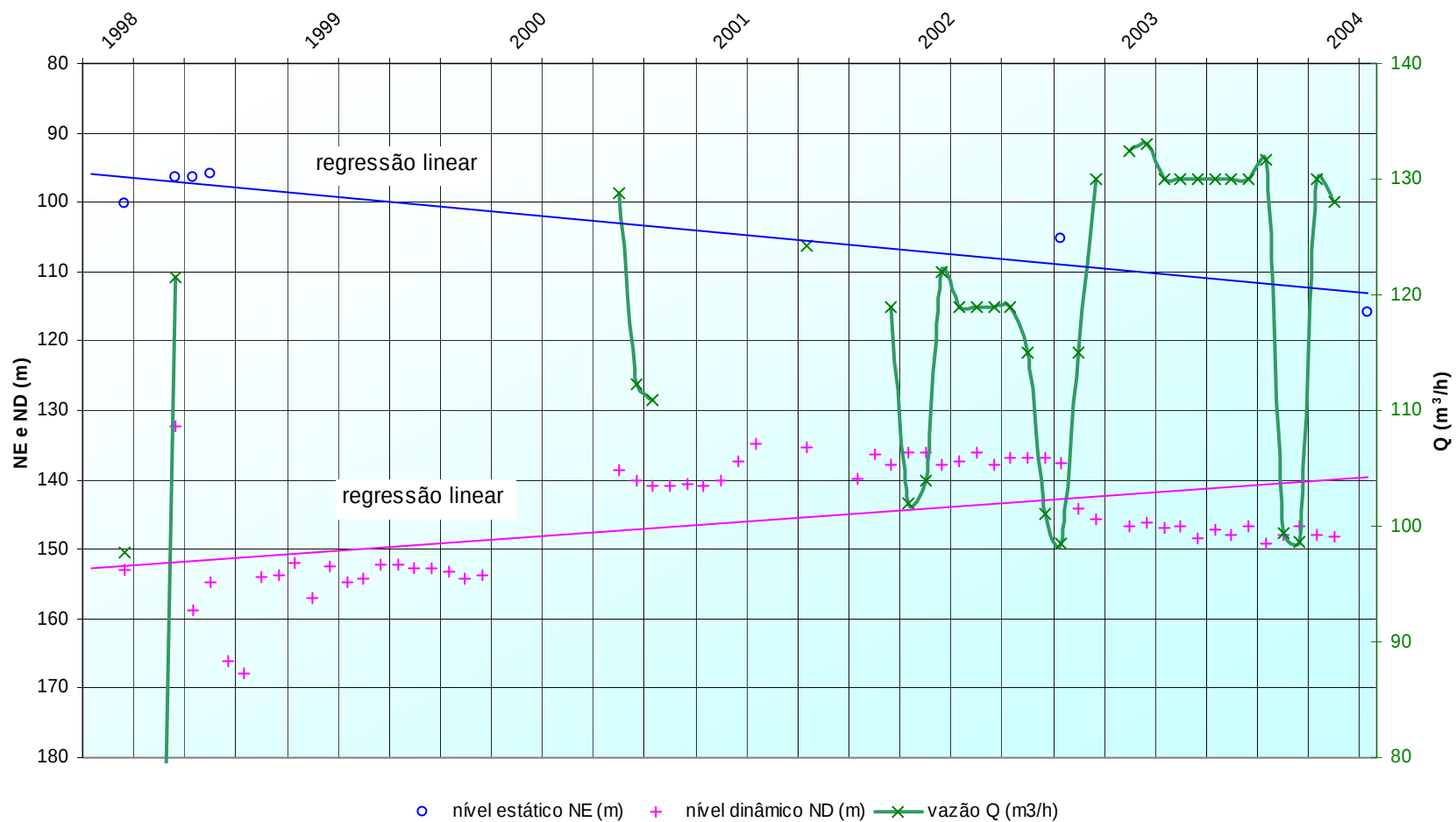


Figura 31: Gráfico de evolução da performance do poço nº 21 – Cruzeiro do Sul

O gráfico do poço nº 22 – Parque Fehr (**Figura 32**) mostra queda do nível estático, de 2,4 m, em 6 anos de operação. A vazão apresenta oscilações provavelmente provocadas por alterações das condições operacionais. Essas oscilações e tendência geral de redução da vazão têm sido acompanhadas por oscilações e elevação do nível dinâmico, respectivamente, indicando a manutenção das condições originais de performance hidráulica do poço.

A pequena queda do nível estático se deve ao período relativamente curto de operação e à localização afastada do centro da cidade.

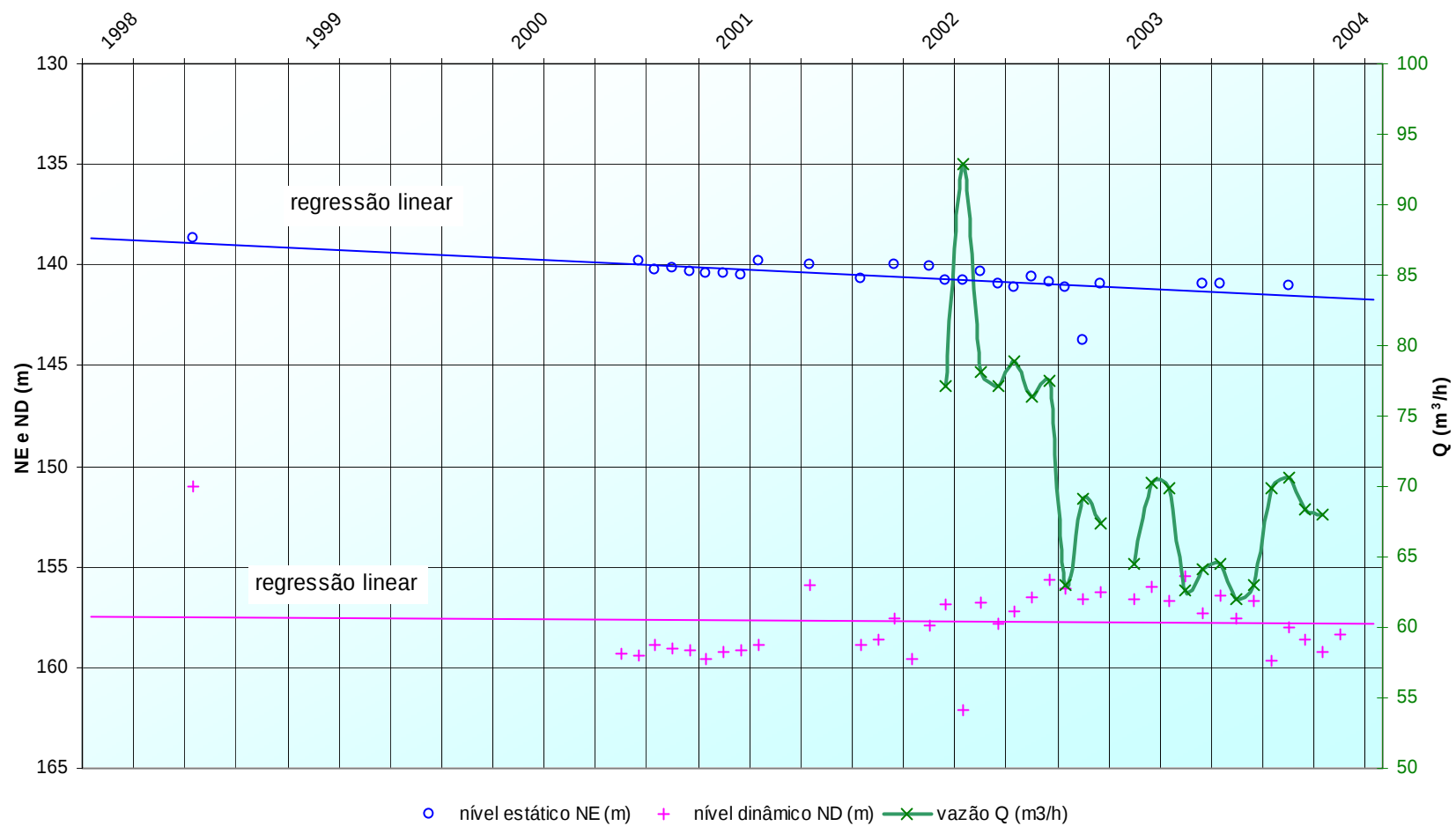


Figura 32: Gráfico de evolução da performance do poço nº 22 – Parque Fehr

Os dados do teste de bombeamento que constam do relatório de construção do poço nº 23 – Jockey Club II indicam que o valor inicial da vazão específica (vazão por unidade de rebaixamento) era de $5,9 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

O gráfico do gráfico do poço nº 23 – Jockey Club II (**Figura 33**) mostra queda do nível estático, de 2,4 m, em 5 anos de operação. A vazão apresenta oscilações que não são inteiramente refletidas no nível dinâmico pois o valor da vazão específica evoluiu de 5,9 para quase $11,0 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

A pequena queda do nível estático se deve ao período relativamente curto de operação e à localização afastada do centro da cidade e o aumento da capacidade específica como decorrência do desenvolvimento natural e gradual do poço durante a operação.

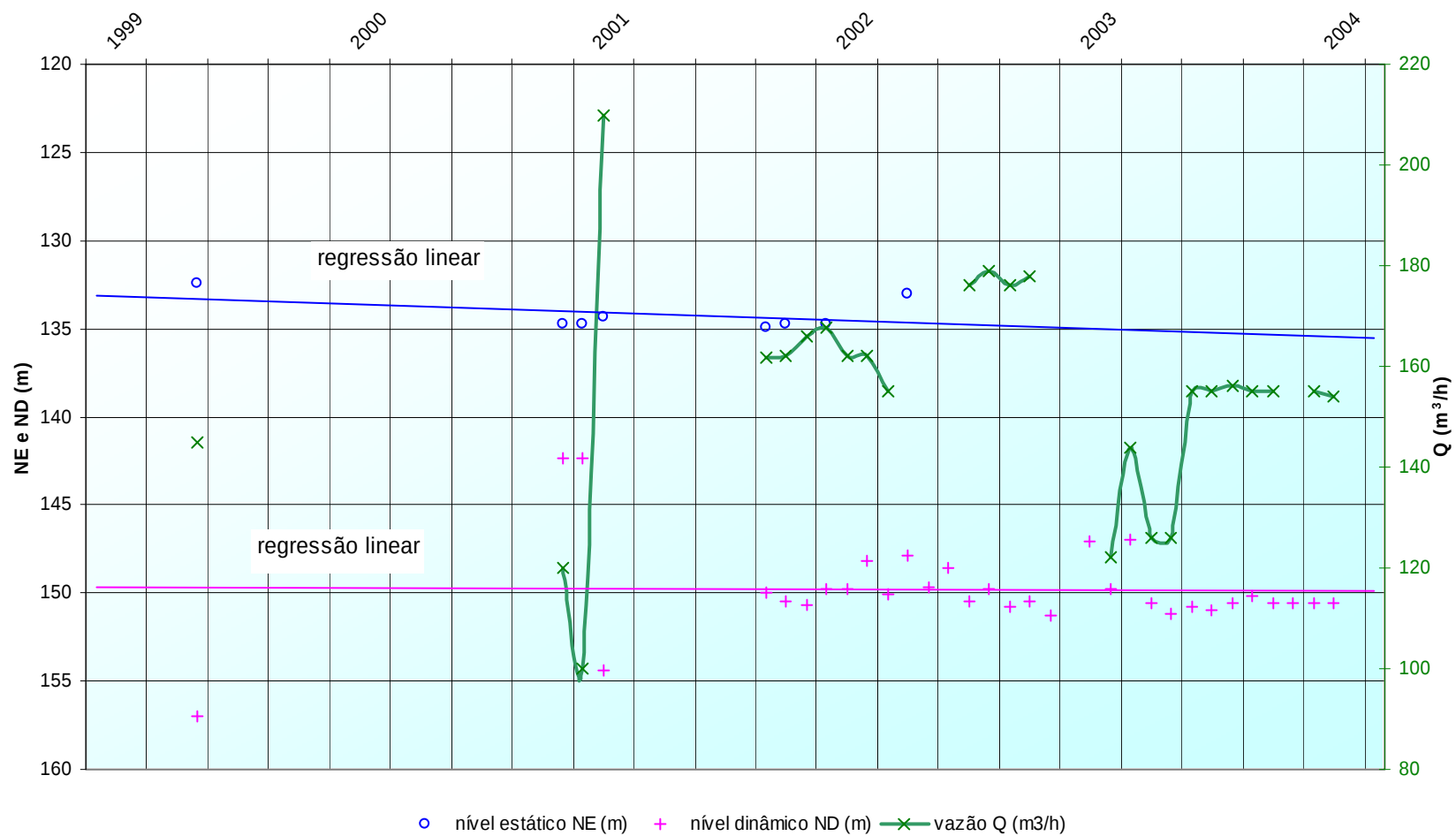


Figura 33: Gráfico de evolução da performance do poço nº 23 - Jockey Club II

Tabela 12: Resumo da avaliação das séries históricas de dados dos poços.

nº do poço	nome	aqüífero	classe						
			A	B	C	D	E	F	G
1	Água Vermelha I	G							
2	Antônio Fischer dos Santos	bas/G			X			X	
3	Novo Horizonte	bas/G							
4	Parque Delta	bas							
5	Distrito Industrial Miguel Abdelnur	bas/G			X			X	
6	Santa Marta I	bas							
7	Santa Marta II	bas							
8	Samambaia	G			X				X
9	Maria Stela Fagá	Gc			X			X	
10	Água Vermelha II	bas							
11	Azuville II	Gc			X	X		X	
12	São Carlos III	Gc			X		X		
13	Jockey Club I	Gc							
14	Parque Faber	bas/G			X	X		X	
15	Santa Felícia	Gc	X					X	
16	Boa Vista	Gc			X	X		X	
17	Cidade Aracy	Gc			X				
18	Santa Eudoxia	G		X					
19	Tramer	G			X		X	X	
20	Vila Nery	Gc			X	X		X	
21	Cruzeiro do Sul	G			X		X		X
22	Parque Fehr	G			X			X	
23	Jockey Club II	Gc			X		X		
24	Nova Estância	Gc							
25	Douradinho	G							
26	Núcleo Hab. Waldomiro Lobbe Sobrinho	G							
27	Água Vermelha III	G							
28	Vila Alpes	G							
classe			totais						
A	falta dados de nível da água		1						
B	sem alteração de nível e vazão		1						
C	depleção do aqüífero		14						
D	perda de performance do poço		4						
E	melhoria de performance do poço		4						
F	redução da vazão		10						
G	aumento da vazão		2						
LEGENDA	situação dos poços em 2004			poços desativados ou abandonados					
				poços com pouco tempo de operação					
			B	Bauru					
			bas	basalto					
	AQÜÍFERO		bas/G	basalto e Guarani					
		G	Guarani livre						
		Gc	Guarani confinado						

A análise dos gráficos das séries históricas de dados individuais de cada poço, cujo resumo é apresentado na **Tabela 12** indica que:

1. O nível potenciométrico do aqüífero vem sendo rebaixado progressivamente, alcançando 32 m no poço mais antigo, ao longo de 35 anos de exploração, ou seja com uma taxa média de 0,9 m/ano.;

2. 14 dos 16 poços analisados indicam a depleção do nível da água. Um dos poços (nº 15 – Santa Felícia) não dispõe de dados de nível da água mas é provável que também apresente queda do nível estático. A única exceção é o poço nº 18 – Santa Eudóxia que é afastado da cidade e capta o Aquífero Guarani livre. Entre os poços que apresentam queda do nível da água encontram-se as mais variadas características construtivas e todas as classificações de aquífero captado;
3. Entre os poços que foram monitorados, as quedas mais acentuadas do nível ocorreram naqueles de maior vazão (Vila Nery, Maria Stella Fagá, Cruzeiro do Sul e Boa Vista).
4. 10 poços apresentaram redução da vazão bombeada relacionada ao rebaixamento progressivo do nível potenciométrico que faz com que as bombas sejam operadas fora do seu ponto de ótimo rendimento;
5. 4 poços (nº 11, 14, 16 e 20) apresentam indícios de perda de performance hidráulica que deve estar relacionada ao processo de envelhecimento do poço, falta ou insuficiência de manutenção. Esse fato funciona como um fator adicional de agravamento da redução da vazão;
6. 3 poços (nº 19, 21 e 23) apresentaram melhoria da performance hidráulica, interpretada como sendo decorrente do desenvolvimento insuficiente do poço na época da construção. No poço 12, a melhoria da performance foi resultante de serviço de manutenção; e
7. Apenas em 2 poços (nº 8 e 21) houve aumento da vazão bombeada.

6.3. Análise dos sistemas de bombeamento dos poços

6.3.1. Características dos sistemas de bombeamento

Na **Tabela 13** estão relacionados os equipamentos de bombeamento dos poços do SAAE, que se encontravam instalados em Abril/2004, incluindo os poços que já se encontravam desativados mas com as bombas ainda instaladas.

Tabela 13: Equipamentos de bombeamento dos poços do SAAE

nº do poço	(1) tipo de bomba	fabricante	modelo	nº de estágios	rotação (rpm)	tensão (V)	(2) sistema de acionamento	potência nominal (cv)	corrente nominal (A)	cabo elétrico (mm²)	tempo de operação (anos)	tempo médio de operação em 2003 (h/dia)
2	1	Leão	S 40-9	9	3.500	220	1	50,0	60,0	3x70	2,10	16,94
4	1	Leão			3.500					3x16	2,09	
5	1	Leão	S30-14	14	3.500	220	1	27,5	77,0		4,29	11,83
8	1	Leão	R 16-8	13	3.500	220	2	15,0	42,0		0,88	20,55
9	1	Pleuger	P84-7	7	3.500	380	2	115,0	175,0		4,14	19,20
10	1	Leão	R 10-12	12	3.500	220	1	8,0	23,0	3x10	2,10	
11	1	Pleuger	Q82-5	5	3.500	380	2	90,0	139,0	3x50	1,56	19,74
12	1	Ebara	BHS 1012-6	6	3.500	440	1	150,0	213,0	1x185	0,61	15,80
13	1	Ebara		12	3.500		1	40,0				
14	1	Leão	R25,14	14	3.500	220	1	20,0	72,6	3x35	0,62	9,04
15	2	Esco	12DEB		1.750	440	1	550,0	592,0		6,17	14,12
16	1	Pleuger	P104-5	5	3.500	440	1	350,0	277,0	1x185	0,69	20,64
17	2	Esco	9DEB		1.750	440	1	250,0	290,0		9,54	18,87
18	1	Ebara	BHS 512-13	13	3.500	220	1	20,0				15,48
19	1	Leão	S 40-9	9	3.500	220	1	22,5	60,2	3x70	3,10	7,45
20	2	Esco	12DEB	18	1.750	440	2	450,0	525,0		6,99	19,39
21	1	Ebara	BHS 1010-8	8	3.500	440	2	140,0	200,0	1x120	1,48	21,43
22	1	Leão	ES85-8	8	3.500	440	1	90,0	126,0	3x70	0,44	7,04
23	1	Pleuger	P104-5	5	3.500	440	2	200,0	140,0	1x240	3,17	13,36
24	1	Ebara	BHS 1015-8	8	3.500	440	2	350,0	480,0	1x185	0,59	
25	1	Ebara	BHS 813-8	8	3.500	440	2	100,0		3x70		18,88
26	1	Ebara	BHS 813-7	7	3.500	380	1	90,0			1,70	
27	1	Pleuger	P63-13		3.500	220	1	30,0		3x70	1,03	14,36
28	1	Ebara	BHS 1010-8	8	3.500	440	1	140,0	200,0	3x185	0,25	13,97
FONTE: Relatórios de manutenção				(1) tipo de bomba	1 submersa	(2)	1 autotransformador					
					2 eixo prolongado	acionamento	2 partida suave					

Na **Tabela 13** são apresentados os tempos em operação (período computado em Abril/2004, desde a última instalação) para as bombas de eixo prolongado são superiores a 4 anos, ao passo que os das bombas submersas são, em média, da ordem de 2 anos. Os tempos médios de funcionamento diário das bombas em 2003 foram determinados com base nos dados do volume total mensal e de vazão média instantânea e são em geral elevados, com média entre todos os poços de 15,69 h/dia e, assim sendo, a interrupção do funcionamento de apenas um poço pode provocar sérias dificuldades de abastecimento. Os sistemas de acionamento elétrico das bombas em 8 poços são do tipo partida suave e nos demais, autotransformador.

Em apenas 3 poços, as bombas são do tipo eixo prolongado, de fabricação Esco. Nos demais poços, as bombas são do tipo submersa, de fabricação Leão, Ebara e Pleuger, que se enquadram nas faixas de potência indicadas na **Tabela 14**.

Tabela 14: Resumo da potência por fabricante das bombas dos poços do SAAE

fabricante	potência nominal (cv)		quantidade
	de	até	
Leão	0	10	1
Leão			6
Ebara	10	50	1
Pleuger			1
Ebara	50	100	3
Pleuger			1
Ebara	100	200	3
Pleuger			2
Esco			3
Ebara	200	500	1
Pleuger			1
total			23

Na **Tabela 15** são apresentadas as condições de instalação das bombas dos poços do SAAE, incluindo comprimento e diâmetro da tubulação edutora e da interligação dos poços aos reservatórios de descarga, altura dos reservatórios, e os tipos e fabricantes dos dispositivos de medida de

vazão atualmente instalados sendo que inicialmente as medidas de vazão eram feitas com placa de orifício. Em diversos relatórios do monitoramento dos poços, é comum a falta de medidas de vazão que, segundo informação do setor de operação e manutenção do SAAE, esse fato é devido aos constantes danos do **display** dos equipamentos de medição de vazão, causados por descargas elétricas e os elevados custos de reparo.

Tabela 15: Condições de instalação das bombas dos poços

nº do poço	(1) equipamento para medida de vazão	coluna edutora		cavelete e interligação	
		prof. instalação da bomba (m)	diâmetro (pol)	comprimento (m)	diâmetro (pol)
2	1	85	4	15	4
5	1	105	3	3	3
8	2	91	2 1/2	3	2 1/2
9	1	189	7	5	7
11	1	121	6	2	6
12	3	216	6	4	6
14	2	146	3	20	3
15	1	270	10	15	10
16	1	207	6	50	6
17	1	115	8	40	8
18	2	112	3	10	3
19	1	136	5	600	6
20	1	240	8	40	8
21	4	169	7	35	6
22	2	181	4	10	4
23	2	202	7	20	7
24	2	235	8	18	8
25	2	192	4	6	4
26	2	150	4	40	4
27	2	233	3	20	3
28	2 e 6	165	6	50	6

FONTE: Relatórios de manutenção dos poços e bombas e informações verbais do setor de operação do SAAE

(1) vazão

1 Eletromagnético Fisher Rosemont

2 Inserção palheta Signet

3 Eletromagnético Levelcontrol

4 Eletromagnético Conaut

5 Mecânico Voltman

6 Proporcional

As medidas de nível da água são feitas com medidores elétricos manuais por meio de tubo guia instalados paralelamente à tubulação edutora em todos os poços porém, nos poços Santa Felícia e Vila Nery, encontram-se

obstruídos e/ou danificados, há muito tempo, não sendo possível descer o medidor de nível da água.

6.3.2. Avaliação do rendimento dos sistemas de bombeamento

Adotando-se a metodologia descrita no **item 4.4**, foram calculados os dados que constam da **Tabela 16**, onde foram utilizados os dados de monitoramento do ano de 2003, adotando-se os valores médios das medidas mensais de vazão, nível dinâmico, tensão e corrente elétrica, sendo que em dois poços (nº 15 e 17), por não disporem de medidas de nível dinâmico, foram adotadas estimativas baseadas nos dados originais de vazão específica e projeções de rebaixamento do nível estático ⁵. Os valores de potência consumida foram obtidos mediante a aplicação da **Equação 6**, as perdas de carga por atrito nas tubulações (inclusas no cálculo da AMT) foram determinadas pela aplicação das **Equações 9 e 10**.

O valor elevado de perda de carga abaixo da superfície encontrado no poço nº 26 se deve ao diâmetro sub dimensionado da tubulação edutora de apenas 4" para vazão de 131 m³/h, resultando em velocidade excessiva da água no interior da tubulação.

Os poços que apresentam os valores mais elevados de perda de carga acima da superfície são os seguintes:

- Poço nº 19: devido ao comprimento de 619 m da sub adutora; e
- Poços nº 8, 14, 18, 26 e 27: devido ao sub dimensionado da tubulação adutora, resultando em velocidade excessiva da água no interior da tubulação.

⁵ adotando a taxa média de rebaixamento do nível estático de 0,9 m/ano, conforme item 5.3

Tabela 16: 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

nº do poço	Q (m³/h)	(1) ND (m)	(2) perdas de carga abaixo da superfície (m)	(3) altura do recalque (m)	(4) perdas de carga acima da superfície (m)	(1+2+3+4) AMT (m)	potência consumida (kWh)	consumo unitário (kWh/m³)
2	49	77,1	2,15	2,00	0,61	81,82	21	0,440
5	40	92,4	7,01	2,00	5,19	106,55	24	0,617
8	18	80,3	3,53	2,00	8,43	94,26	13	0,748
9	93	168,3	1,03	3,00	0,57	172,87	80	0,858
11	115	111,5	2,07	2,50	0,43	116,48	63	0,545
12	128	176,2	4,26	2,00	1,23	183,66	144	1,123
14	18	125,2	2,23	18,00	21,65	167,11	20	1,145
15	281	225,0	1,95	2,00	0,33	229,28	342	1,215
16	156	156,7	5,90	8,00	3,45	174,09	171	1,095
17	172	110,0	1,07	23,00	0,33	134,40	157	0,917
18	29	97,4	4,21	18,00	9,03	128,60	20	0,687
19	22	116,7	0,28	18,00	14,97	149,95	22	1,009
20	286	192,7	5,16	2,00	1,09	200,93	348	1,219
21	117	145,9	1,40	9,00	1,97	158,25	125	1,066
22	66	157,2	7,57	21,00	6,14	191,89	71	1,069
23	155	149,7	2,73	18,00	0,99	171,44	188	1,217
24	285	199,6	5,06	2,00	0,70	207,39	345	1,210
25	49	160,9	4,66	21,00	5,58	192,12	97	1,966
26	131	101,1	21,69	10,00	10,33	143,14	90	0,687
27	22	210,4	5,04	20,00	49,07	284,49	30	1,401
28	182	128,7	6,32	15,80	2,37	153,19		

Obs.: em vermelho e itálico valores estimados de ND

Na **Tabela 17** são apresentados os valores médios da produção mensal de água e de consumo de energia elétrica ⁶ obtidos dos relatórios gerenciais mensais do ano de 2003.

⁶ descontando-se a parcela consumida pelas bombas de recalque, conforme metodologia apresentada no item 4.4.3

Tabela 17: Valores médios calculados de energia consumida e de produção mensal de água do ano de 2003

nº do poço	potência nominal (cv)			fração de tempo operação bomba recalque	parcela consumo bomba poço %	energia consumida fora da ponta (kWh/mês)	energia consumida na ponta (kWh/mês)	produção (m³/mês)	consumo unitário (kWh/m³)
	bomba do poço	recalque 1	recalque 2	recalque 3					
2	50,0	40			0,50	71%	16.581	24.673	0,672
5	27,5	15			1,00	65%	7.840	14.055	0,558
8	15,0	30			0,50	50%	6.140	16.026	0,383
9	115,0	60			1,00	66%	50.949	53.645	0,950
11	90,0	30			0,70	81%	41.999	68.040	0,617
12	150,0	60			0,30	89%	65.552	60.601	1,082
14	20,0	20	20		0,50	50%	6.672	4.773	1,398
15	550,0	40	40		0,50	93%	153.312	9.466	119.137
16	350,0	30	30	30	0,70	85%	108.511	6.000	96.876
17	250,0					100%	76.429	3.223	97.144
18	20,0					100%	9.444		13.393
19	22,5					100%	4.985		4.972
20	450,0	25	25		0,50	95%	190.127	5.138	166.097
21	140,0	30			0,70	87%	64.766	2.011	75.233
22	90,0					100%	14.449		14.017
23	200,0	10			1,00	95%	71.777		62.018
24	350,0	70			1,00	83%			
25	100,0					100%	24.002		27.863
26	90,0	15			1,00	86%			
27	30,0					100%	13.626	9.307	1,464
28	140,0					100%	49.660	76.372	0,650

Fontes: Relatórios gerenciais de produção de água e informações verbais do setor de operação sobre as potências das bombas de recalque e tempos de funcionamento

Na **Tabela 18** são apresentados os resultados dos cálculos, utilizando a **Equação 8**, do rendimento eletromecânico: η_1 e η_2 , com base nos dados das **Tabelas 16 e 17**, respectivamente, sendo que os valores de altura manométrica total nos dois cálculos de rendimento foram os mesmos e correspondem aos valores apresentados na **Tabela 16**.

Tabela 18: Valores de rendimento eletromecânico calculados com base nos dados da **Tabela 16** (η_1) e **Tabela 17** (η_2)

nº do poço	rendimento (η_1)	rendimento (η_2)	média
2	51%	33%	42%
5	47%	52%	49%
8	50%	67%	58%
9	55%	50%	52%
11	58%	51%	55%
12	45%	46%	45%
14	40%	33%	36%
15	51%	46%	49%
16	43%	40%	42%
17	40%	45%	42%
18	51%	50%	50%
19	40%	41%	41%
20	45%	47%	46%
21	40%	49%	44%
22	49%	51%	50%
23	38%	40%	39%

Os valores de rendimento eletromecânico da **Tabela 18**, são representados no gráfico da **Figura 34**, onde se verifica que, em geral, os resultados dos dois métodos de cálculo do rendimento eletromecânico são semelhantes, com exceção de apenas dos poços nº 2 e 8, onde os valores são discrepantes, o que confirma a possibilidade da utilização da metodologia proposta para avaliação da performance dos sistemas de bombeamento.

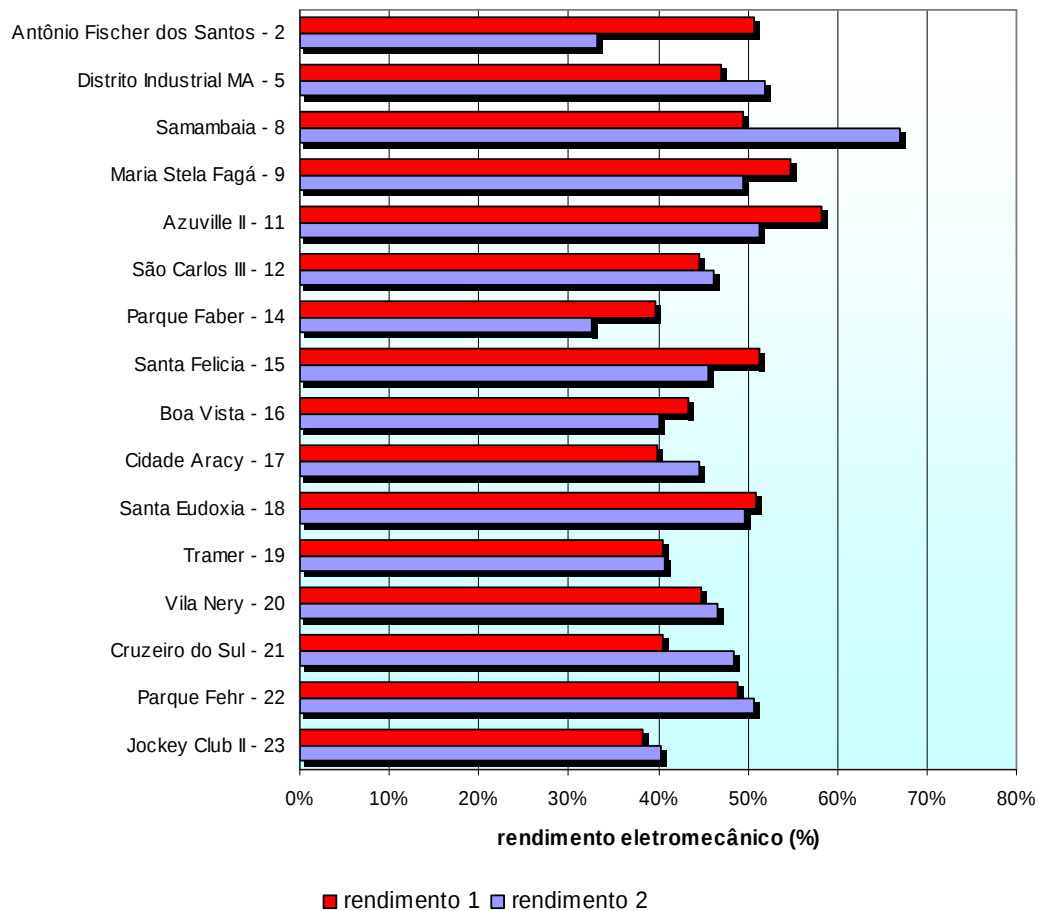


Figura 34: Comparação entre os valores (η_1) e (η_2) do rendimento eletromecânico dos sistemas de bombeamento dos poços

Os valores calculados de rendimento (valor médio) apresentam alguns resultados surpreendentemente altos, tais como:

- 2 bombas submersas, de fabricação Pleuger, instaladas nos poços nº 9 e 11, com rendimento de 52 % e 55 %, respectivamente; e
- 49% para uma bomba de eixo prolongado, de fabricação Esco, com mais de 6 anos de operação, instalada no poço nº 15.

Na maioria dos poços em que foi possível efetuar o cálculo do rendimento eletromecânico dos sistemas de bombeamento, os valores obtidos situaram-se entre 40 e 50%.

Tendo em vista que nos catálogos e curvas de performance, fornecidos pelos fabricantes, os valores de rendimento eletromecânico dos conjuntos motor-bomba são, em geral, superiores a 75% e considerando um valor hipotético do rendimento dos demais componentes do sistema (cabos elétricos, transmissão mecânica) de 85%, os valores do rendimento global dos sistemas de bombeamento deveriam ser de, no mínimo, 64%. Portanto, os valores obtidos do rendimento global dos sistemas de bombeamento podem ser considerados baixos e provavelmente são decorrentes de: desgaste excessivo (idade da bomba), mau dimensionamento ou alteração da condição operacional, manutenção insuficiente ou ineficiente e tecnologia de fabricação ultrapassada.

6.3.3. Despesas com energia elétrica nos sistemas de bombeamento

No ano de 2003, os poços do SAAE produziram em conjunto 9,5 milhões de m³ de água, consumindo cerca de 10 mil MWh ⁷, o que representou uma despesa de R\$ 1,6 milhões, que resulta em um custo unitário médio da água subterrânea produzida em 2003 de R\$ 0,17/m³.

Na **Tabela 19** são apresentados os valores médios mensais, do ano de 2003, das despesas com energia elétrica, computadas apenas para as bombas dos poços, individualmente para cada poço e o valor médio global do conjunto de poços. Os valores de despesa e os de consumo de energia elétrica (apresentados anteriormente na **Tabela 17**) não apresentam uma relação direta pois os valores das contas de energia elétrica estão acrescidos de multas por ultrapassagem da demanda e elevação da tarifa pelo funcionamento em horário de ponta. Alguns poços apresentam custo operacional bem acima da média, sendo que em quatro poços (nº 14, 19, 22 e 27), o custo unitário da água ultrapassa R\$ 0,30/m³.

⁷ Considerando apenas a parcela da conta de energia devida à bomba do poço segundo metodologia descrita no **item 4.4.3**

Os poços com custo operacional elevado são em geral de baixa produção e podem apresentar consumo excessivo de energia pelo baixo rendimento do sistema de bombeamento decorrente de alteração da condição de operação, que altera a carga de trabalho da bomba, reduz a vazão bombeada e desloca o ponto ótimo de trabalho da bomba para outro de menor eficiência. As seqüências históricas de dados dos poços indicam que o principal fator causador de alteração da condição operacional é o rebaixamento progressivo do nível potenciométrico do aquífero (ver **item 5.3**).

Tabela 19: Despesas de energia elétrica dos sistemas de bombeamento dos poços

nº do poço	plano tarifário de energia elétrica	produção (m³/mês)	despesas de energia elétrica (R\$/mês)	custo unitário (R\$/m³)
2	convencional	24.673	3.641	0,148
5	convencional	14.055	2.527	0,180
8	convencional	16.026	1.523	0,095
9	convencional	53.645	8.689	0,162
11	convencional	68.040	8.125	0,119
12	convencional	60.601	14.164	0,234
14	convencional	4.773	2.034	0,426
15	convencional	119.137	20.478	0,172
16	verde	96.876	17.063	0,176
17	verde	97.144	10.767	0,111
18	convencional	13.393	2.557	0,191
19	convencional	4.972	1.610	0,324
20	verde	166.097	25.887	0,156
21	verde	75.233	10.036	0,133
22	convencional	14.017	5.946	0,424
23	convencional	62.018	15.422	0,249
24	verde			
25	convencional	27.863	5.927	0,213
26	convencional			
27	convencional	9.307	3.298	0,354
28	convencional	76.372	8.249	0,108
total		1.004.244	167.942	
valor médio global				0,167

Na **Tabela 19** são apresentados também os planos tarifários de energia elétrica dos sistemas de bombeamento dos poços, que, em geral, é o convencional, com exceção de 5 poços, com potência instalada superior a 50 kW, onde o sistema é verde. Tendo em vista que existem mais 9 poços em que a potência da bomba é superior a 50 kW, deveriam ser analisadas as condições para renegociação dos respectivos contratos de fornecimento de energia elétrica, visando a redução das tarifas nesses poços.

6.4. Soluções para otimização do sistema

6.4.1. Utilização de equipamentos de bombeamento de alto rendimento

Os estudos realizados indicaram que os rendimentos dos sistemas de bombeamento apresentam atualmente baixos valores de rendimento eletromecânico e, portanto, uma das medidas possíveis para otimização do consumo de energia elétrica nos sistemas de bombeamento dos poços do SAAE de São Carlos seria a substituição dos conjuntos motor-bomba atuais por equipamentos de alto rendimento.

Segundo catálogos e curvas de performance dos fabricantes de bombas submersas de alto rendimento, produzidas e comercializadas no país, o valor do rendimento eletromecânico dos conjuntos motor-bomba é da ordem de 80%. Portanto, seria seguro considerar um valor de rendimento teórico de 76% para os conjuntos de motor-bomba de alto desempenho. Para os demais componentes do sistema (unidade de alimentação elétrica, queda de tensão de 4% nos cabos elétricos, etc.) foi estimado um valor seguro de rendimento de 85%, o que resulta numa expectativa de rendimento global do sistema de, no mínimo, 65%. Segundo PERRONI e RODRIGUES (2004), esse valor foi obtido em condição real e pode ser portanto considerado viável de ser alcançado com equipamentos disponíveis no mercado.

A **Tabela 20** apresenta a quantificação da redução do consumo de energia dos sistemas de bombeamento com a substituição dos equipamentos de bombeamento com rendimento global de 65%. Nos cálculos efetuados foi considerado que seria mantido o regime operacional dos poços que foi registrado durante o ano de 2003, ou seja mantendo-se os períodos de funcionamento e a produção individual média.

Tabela 20: Projeção da redução do consumo de energia elétrica com 65% de rendimento em todos os sistemas de bombeamento dos poços

nº do poço	2003			teórico com 65% rendimento		
	potência consumida (kW)	consumo fora ponta (kWh)	consumo na ponta (kWh)	potência consumida (kW)	consumo fora ponta (kWh)	consumo na ponta (kWh)
2	21	16.581		17	8.417	
5	24	7.840		18	6.093	
8	13	6.140		7	6.437	
9	80	50.949		67	38.213	
11	63	41.999		56	33.108	
12	144	65.552		98	44.383	
14	20	6.672		12	6.896	
15	342	153.312	9.466	270	107.876	6.661
16	171	108.511	6.000	114	63.464	3.509
17	157	76.429	3.223	97	52.467	2.212
18	20	9.444		16	7.213	
19	22	4.985		14	3.242	
20	348	190.127	5.138	240	131.861	3.563
21	125	64.766	2.011	78	46.442	1.442
22	71	14.449		53	8.437	
23	188	71.777		111	47.474	
24				248	103.774	
25	97	24.002		40	21.344	
26				78	32.867	
27	30	13.626		26	11.771	
28	118	49.660		117	48.998	
totais	2.055	976.821	25.839	1.776	830.775	17.388
			redução	279	146.045	8.451
			%	14%	15%	33%

Os resultados obtidos indicam que a utilização de equipamentos de bombeamento de alto desempenho poderia gerar uma taxa redução média de 15% de consumo total de energia elétrica, em relação aos valores registrados em 19 poços no ano de 2003. O valor total da redução de demanda seria de 279 kW, do consumo fora da ponta, 146.045 kWh e do consumo na ponta, de 8.451 kWh (**Tabela 20**).

Os resultados acima permitiram quantificar a redução das despesas de energia elétrica, conforme dados da **Tabela 21**, utilizando-se os valores atuais das tarifas do plano tarifário horosazonal verde. Os valores de redução do consumo e da demanda, resultam numa economia global anual de R\$ 270 mil. Para o cálculo do período de amortização, foi adotado o período de 5 anos e a taxa de juros de 15% ao ano, resultando no valor presente da economia de energia elétrica de R\$ 900 mil.

Tabela 21: estimativa da redução das despesas com energia elétrica em 5 anos, com taxa anual de juros de 15%

item	unidade	redução	tarifa (R\$)	economia (1.000 R\$)	
				mensal	anual
demanda	kW	279	7,973	2	27
consumo fora da ponta	kWh	146.045	0,097767	14	171
consumo na ponta	kWh	8.451	0,716873	6	73
total				23	271
valor presente, com taxa de 15%, ao longo de 5 anos					908

Segundo informações obtidas por **e-mail**, em 26/10/2004, junto ao fabricante mais tradicional no Brasil, a KSB Bombas Hidráulicas S.A., o preço de bombas submersas de alto rendimento pode ser avaliado de forma aproximada em função da potência e equivale a R\$ 800,00 por kW. Desta forma, uma estimativa aproximada dos custos para substituição das bombas, pode ser feita da seguinte forma:

- Somatória das potências de 19 bombas de alto rendimento (P): 1.776 kW;

- Custo unitário das bombas de alto rendimento (C): R\$ 800,00 / kW;
- Valor total do investimento (P x C): R\$ 1.420 mil

Portanto, o valor estimado da economia de energia elétrica poderia cobrir mais da metade do valor do investimento em cinco anos.

6.4.2. Redimensionamento dos sistemas de bombeamento

A metodologia usualmente aplicada para dimensionamento de sistemas de bombeamento utiliza projeções de rebaixamento do nível da água para um ciclo de bombeamento de 24 h e não considera as respostas do aquífero para longos períodos de exploração e os efeitos de interferência com outros poços. Resulta que os equipamentos de bombeamento que são dimensionados dessa forma irão operar a maior parte da sua vida útil fora do seu ponto de melhor rendimento. Por outro lado, se no dimensionamento for adotada uma projeção do nível dinâmico para o final da vida útil da bomba resulta no super dimensionamento para o período inicial de operação e conseqüentemente em desperdício de energia em válvulas estranguladoras do fluxo.

A quantificação das projeções futuras dos rebaixamentos em cada poço a serem consideradas no dimensionamento dos equipamentos de bombeamento exigiria a implantação de um modelo matemático dos aquíferos, que possibilitaria, também, definir diretrizes para assegurar a sustentabilidade do aproveitamento da água subterrânea na área. Porém, na sua falta podem ser utilizadas as linhas de tendência de evolução do nível da água estabelecidas com base em dados de monitoramento dos poços a exemplo das que foram apresentadas no **item 5.3**.

Outro fator referente ao dimensionamento dos sistemas de bombeamento é o do recalque adicional da água em superfície, desde a boca do poço, até o reservatório de distribuição, que pode ser feito de duas formas:

1. a própria bomba do poço pode ser dimensionada para vencer a altura do reservatório e as perdas de carga da sub-adutora; e
2. a bomba do poço é dimensionada para elevar a água até um reservatório intermediário e o recalque até o reservatório de distribuição é feito com bombas centrífugas de eixo horizontal.

No primeiro caso, a bomba super-dimensionada do poço exigirá que o diâmetro do poço também seja super-dimensionado para poder comportá-la em seu interior, o que pode implicar numa elevação excessiva do custo construtivo do poço.

No segundo caso, se faz necessário construir um reservatório intermediário, que, dependendo da vazão do poço, poderá ter um custo elevado e resultar em um sistema com controle operacional delicado para compatibilizar a vazão da bomba de recalque com a do poço.

As variações simultâneas de altura manométrica (nível dinâmico) e vazão representam os principais fatores complicadores para o correto dimensionamento dos equipamentos de bombeamento para poços. Devido a essa característica intrínseca de carga variável, a condição ótima de operação dos poços é obtida com sistemas que permitem a variação da rotação da bomba. Atualmente, a solução técnica para esse problema é a utilização de sistemas de acionamento dos motores elétricos com inversores de frequência, apresentada adiante, no **item 5.5.3**.

PERRONI e RODRIGUES (2004) apresenta uma solução prática e econômica para o problema da complementação do recalque com a aplicação de inversores de frequência intercomunicáveis para acionamento da bomba auxiliar (booster) tipo turbina, em linha, acionada pela pressão gerada pelo funcionamento da própria bomba do poço, conforme ilustrado na **Figura 35**.

No sistema proposto, o acionamento da bomba submersa instalada no interior do poço é comandado pela central de motores em função do nível da água no reservatório. A bomba do poço efetua a elevação da água até a superfície e gera uma pressão adicional equivalente a uma coluna de água de 10 m que é detectada pelo sensor de pressão instalado em superfície e gera o sinal para o acionamento automático da bomba auxiliar (**booster** em linha). A rotação da bomba auxiliar é regulada automaticamente por inversor de frequência de forma a equilibrar a vazão recalçada com a produção da bomba do poço. O rebaixamento do nível da água no interior do poço é monitorado por sensor de pressão instalado juntamente com a bomba submersa e pode gerar dois tipos de comando: o primeiro seria o aumento gradual da rotação da bomba do poço (por meio de inversor de frequência) para manter a vazão constante ao longo dos anos, o segundo pode ser o desligamento automático da bomba, caso o nível da água no interior do poço atinja o valor mínimo de segurança necessário para o seu correto funcionamento.

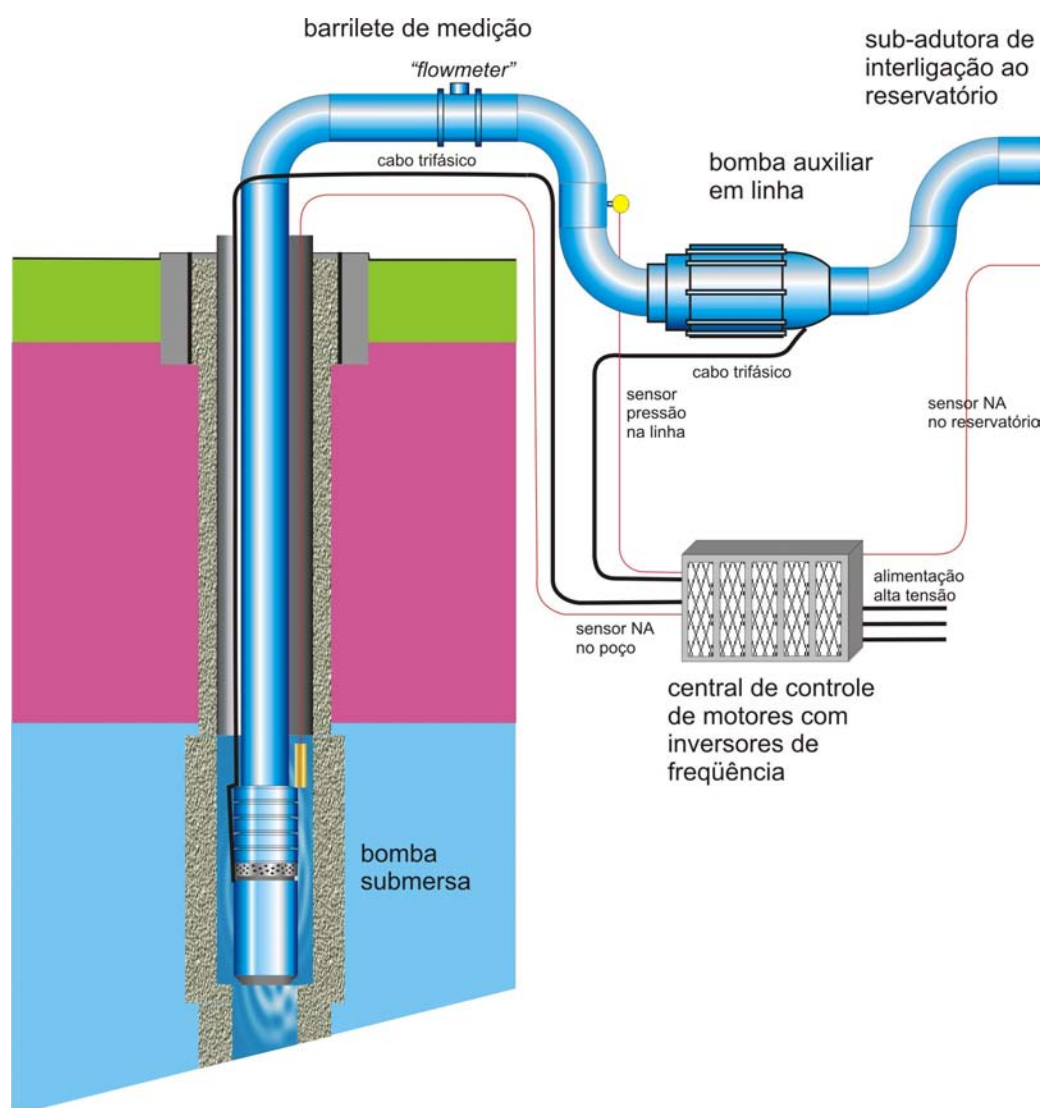


Figura 35: Desenho esquemático de sistema de recalque com bomba em linha e bomba submersa com central de controle de motores e inversores de frequência.

6.4.3. Modernização dos sistemas de acionamento e automação

A bibliografia consultada indica que uma das causas importantes de desperdício de energia em sistemas de bombeamento é a variação de carga na saída das bombas provocadas pelo acionamento de válvulas estranguladoras do fluxo, durante períodos de baixa demanda. No caso de equipamentos de bombeamento de poços tubulares, além da variação de carga na saída do poço, causada pelo mesmo fator mencionado,

ocorre a variação de carga na entrada da bomba devida às variações do nível da água que fazem com que as bombas dos poços operem fora das condições previstas em seu dimensionamento, tais como: variações de nível da água a cada ciclo de funcionamento da bomba (desde o estático até o dinâmico), variações do nível da água provocadas por alterações da vazão bombeada, rebaixamento progressivo do nível potenciométrico do aquífero, interferência entre poços próximos e com funcionamento simultâneo, redução de performance do poço e outros.

Desta forma, além da utilização de equipamentos com alto rendimento eletromecânico e adotando-se as projeções de queda de nível da água no dimensionamento das bombas, sugere-se a utilização de inversores de frequência para o acionamento dos novos equipamentos de bombeamento dos poços, como forma de proporcionar economia adicional de energia elétrica e preservação da vida útil dos equipamentos.

A aplicação de inversores de frequência para acionamento das bombas dos poços deverá proporcionar economia de energia ainda maior, quando a rotação da bomba for comandada automaticamente por sensor de nível da água no interior do poço e sensor de pressão na saída do poço devido aos seguintes fatores:

- a bomba do poço pode ser super-dimensionada, sem que isso represente um acréscimo de consumo de energia pois as variações de nível da água serão compensadas com a mudança da rotação da bomba;
- nos primeiros anos de operação, a bomba irá funcionar com baixa rotação e poderá ser acelerada progressivamente de forma a manter constante a vazão mesmo que o poço venha a apresentar futuramente queda do nível dinâmico; e
- durante cada partida da bomba haverá menor consumo de energia, pois a rotação da bomba será baixa devido ao nível dinâmico alto.

6.4.4. Medidas complementares para reduzir o custo de energia elétrica

Além dos fatores técnicos que correspondem ao objetivo central do presente trabalho, que objetivam a redução da potência dos equipamentos de bombeamento, existem algumas ações administrativas e estruturais que podem contribuir concomitantemente para a redução dos custos operacionais com energia elétrica nos poços do SAAE.

Embora grande parte dessas ações já tenha sido implementada, ao menos parcialmente, ainda existem alguns aspectos que poderiam ser melhorados referentes a: adequação tarifária; alteração da tensão de alimentação; desativação das instalações não utilizadas; correção do fator de potência e melhoria do fator de carga, que pode ser obtida através de alterações do sistema operacional, buscando a minimização do funcionamento em horários de ponta e a otimização da operação com base em custos.

Uma ação que deveria ter caráter emergencial é a adequação das instalações dos poços de forma a viabilizar o monitoramento integral da operação, com medidas precisas de vazão, nível da água no poço (estático e dinâmico) e pressão na saída.

Algumas ações complementares envolvem investimentos adicionais, entre as quais destacam-se: aumento da disponibilidade de reservação para eliminar a necessidade do funcionamento de bombas nos horários de ponta; interligação de setores do sistema de abastecimento; eliminação de recalques diretos com a bomba do poço aos reservatórios de distribuição; redução das perdas de carga em tubulações no interior dos poços e nas interligações aos reservatórios (por exemplo, substituição de tubulações antigas e minimização das perdas localizadas em válvulas e conexões); ampliação do nível de automação da operação.

Entre as medidas relacionadas anteriormente, destaca-se a necessidade de promover a adequação dos diâmetros das tubulações edutoras e adutoras às vazões bombeadas, principalmente nos poços nº 8, 14, 18, 19, 26 e 27.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os dados disponíveis indicam que o sistema de abastecimento público de água de São Carlos utiliza atualmente 2.248 mil m³/mês de água, dos quais 46% (1.036 mil m³/mês), provêm de 21 poços tubulares. A participação da água subterrânea tem tendência a crescer em função das vantagens econômicas que apresenta e a taxa atual de crescimento da demanda equivale à necessidade de construir um novo poço com capacidade de produzir 100 m³/h a cada 2 anos.

A estimativa de disponibilidade anual de água de recarga por infiltração profunda de água meteórica no sistemas aquíferos da área da cidade de São Carlos equivale a 1.836 m³/h, insuficiente para atender a demanda atual estimada de 3.273 m³/h, entre poços de abastecimento público e particulares. Como consequência os aquíferos já apresentam rebaixamento do nível da água, estimado em 32 m para o período de exploração de 35 anos. Alguns poços particulares da área urbana, que contam com outorga de direito de uso da água encontram-se próximos entre si, e próximos de poços utilizados no abastecimento público, podendo gerar competição e conflitos de uso da água.

A avaliação hidrogeológica indicou que a principal área de recarga do Aquífero Guarani encontra-se a sul e sudeste da cidade, em área de expansão da urbanização o que poderá comprometer no futuro a manutenção das condições naturais de disponibilidade volumétrica e qualitativa da água subterrânea na cidade.

A sustentabilidade quantitativa e qualitativa do aproveitamento da água subterrânea na área da cidade de São Carlos exigirá que no futuro as áreas de captação de água subterrânea para abastecimento público sejam implantadas nas zonas de recarga do Aquífero Guarani, localizadas a sul e a norte da cidade, que deverão ser classificadas como áreas de proteção permanente, com vegetação preservada e ou reconstituída, onde deverão ser

construídas baterias de poços. Estações elevatórias e adutoras fariam o transporte da água aos pontos de reservação e distribuição na cidade. Os poços mais antigos da área urbana deverão ser abandonados gradualmente, à medida que forem substituídos pelos poços construídos nas novas áreas planejadas de captação. Nas condições atuais, o rebaixamento progressivo do nível piezométrico nos poços continuará sendo um fator inexorável e deverá ser quantificado através de modelagem matemática do aquífero, para poder ser contemplado de forma adequada no dimensionamento dos sistemas de bombeamento.

A manutenção das condições de qualidade é outro aspecto da sustentabilidade de uso da água subterrânea que deve ser objeto de grande atenção. Nas áreas de afloramento da Fm. Botucatu em que poderão ser instaladas futuras baterias de poços, a vulnerabilidade à contaminação do aquífero é maior e, em alguns locais, as condições de risco também são preocupantes, como, por exemplo, o trecho da Rodovia Washington Luiz, próximo ao trevo de Descalvado, sujeito a acidentes com tombamento de cargas perigosas.

Os dados disponíveis permitiriam que a área da cidade de São Carlos fosse tratada, conforme proposta do CRH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CÂMARA TÉCNICA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA – CRH, 2004), como uma área de restrição para promover a racionalização da exploração da água subterrânea. Adicionalmente, recomenda-se a implantação de uma estrutura municipal para gestão efetiva de recursos hídricos.

No registro de dados dos poços do SAAE de São Carlos, encontra-se um volume apreciável de informações e dados operacionais. No entanto, a sistemática de coleta e análise dos dados não observa integralmente as recomendações do “Manual de operação e manutenção de poços” do DAEE (JORBA & ROCHA, 1982). Diversos relatórios de construção dos poços são incompletos e não possuem todos os dados de campo e/ou as interpretações dos resultados de ensaios de bombeamento. Para o presente trabalho, foram

utilizados os dados operacionais dos poços registrados desde 1992, como parte dos serviços de manutenção dos poços e bombas.

A análise das séries históricas de dados operacionais dos poços indicou que: todos os poços do SAAE localizados na cidade apresentam rebaixamento do nível da água; em 10 poços houve redução da vazão bombeada; 4 poços apresentam indícios de perda de performance; 3 poços tiveram melhoria da performance, devido ao desenvolvimento incompleto do poço após a construção; e em 2 desses poços foi possível aumentar a vazão. O valor médio dos períodos diários de funcionamento dos poços é de 15,69 h/dia e o sistema opera em condições limites em que a parada de apenas um poço pode provocar sérias dificuldades de abastecimento.

Os cálculos dos rendimentos eletromecânicos dos sistemas de bombeamento dos poços apresentaram resultados com valor entre 40 e 50%, que é considerado baixo pois o padrão tecnológico atual do mercado permite a obtenção de valores superiores a 65%.

Entre as principais causas do baixo rendimento eletromecânico dos equipamentos de bombeamento é apontada a alteração das condições operacionais causadas pelo rebaixamento do nível da água no aquífero, que pode ser agravada por desgaste de alguns equipamentos, tecnologia de fabricação ultrapassada, insuficiência ou ineficiência de manutenção.

Nos 19 poços analisados verificou-se que através da utilização de equipamentos de bombeamento de alto rendimento será possível reduzir 15% do consumo de energia elétrica e que a redução equivalente de despesas com energia elétrica em cinco anos seria de R\$ 900 mil, que representa mais da metade dos investimentos necessários para a modernização dos sistemas de bombeamento com a aquisição de bombas submersas de alto rendimento.

O método simplificado de cálculo do rendimento eletromecânico, com base em registros de dados existentes, desenvolvido neste estudo, mostrou-se

adequado para avaliar os desperdícios de energia elétrica nos sistemas de bombeamento instalados em poços tubulares.

Tendo em vista que o trabalho realizado apontou deficiências dos registros de dados operacionais dos poços tubulares do SAAE, recomenda-se que sejam incorporadas as seguintes melhorias:

1. Os casos em que ainda não são efetuadas medidas de nível da água no interior do poço por falta de instalação adequada devem ser resolvidos de forma emergencial. No caso de medidas de vazão, recomenda-se que sejam utilizados sistemas alternativos de medição durante os períodos de manutenção dos dispositivos instalados.
2. Incluir exigências para que na elaboração dos relatórios de monitoramento sejam incluídas justificativas detalhadas para ausências de medidas;
3. Verificação dos valores reais do rendimento eletromecânico dos sistemas de bombeamento instalados em todos os poços e principalmente aqueles com os menores valores calculados no presente trabalho;
4. Além dos dados e informações que vêm sendo medidos e registrados, sugere-se que sejam englobados todos os parâmetros necessários para a análise da performance dos poços e respectivos equipamentos de bombeamento, com a frequência mensal e a precisão de medidas adequadas, devendo-se proceder simultaneamente todas as leituras de instrumentos de medição, em períodos mensais, quais sejam:
 - pressão na saída do poço;
 - horímetros de funcionamento das bombas;
 - totalizadores de volume;
 - consumo de energia e potência consumida de cada bomba (em separado: a bomba do poço e a(s) bomba(s) de recalque em superfície);

- pH, condutividade elétrica, potencial redox, oxigênio dissolvido, gás carbônico dissolvido.
5. Monitoramento da performance da bomba de forma sistemática através do lançamento na curva teórica de um ponto real medido a cada seis meses.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, R.L. (1989). **Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana de São Carlos – SP: contribuição ao planejamento**. 2v. 127p + 14 mapas. Dissertação de Mestrado – Departamento de Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1989.

AQUA BAVARIA GUARANI (2004). **Gerenciamento de aquíferos**. Relatório preparado pelo consórcio de consultores alemães sobre a exploração sustentável do Aquífero Guarani em Ribeirão Preto (SP). Meio Digital.

AZEVEDO, E.B. (2003). **Viabilidade do uso de inversor de frequência em sistemas de irrigação do tipo pivô central**. 77p. Dissertação de Mestrado – Irrigação e Drenagem. Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2003.

BAHIA S.R. (1998). **Eficiência energética nos sistemas de saneamento**. IBAM, PROCEL/ELETROBRÁS. Rio de Janeiro. 76 pg.

BTA ENGENHARIA. (1998). **Planta planialtimétrica, digitalizada e georreferenciada, em escala 1:10.000 da cidade de São Carlos, com a locação dos poços do SAAE**. Arquivo em formato dwg, gravado em CD. 1998.

CÂMARA TÉCNICA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA – CRH. (2004). **Proposta de resolução para definição de áreas de restrição**. <http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/ftp/relatorios/CRH/CTAS>. Acesso em 28/04/2004.

CLABORN, B.J. & RAINWATER K.A. (1991). **Well-Field Management for Energy Efficiency**. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117, No. 10, October 1991, pp. 1290-1303

CONTIN NETO, D. (1987). **Balanço hídrico em bacia hidrográfica situada em região de recarga do Aquífero Botucatu**. 130p. Tese de Doutorado – Departamento de Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1987.

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica. (1974). Estudo de águas subterrâneas – Região Administrativa 6.- Ribeirão Preto. DAEE, São Paulo, 1974, 2 v.

GRUNDFOS, (1996). Manual de Engenharia, Bombas Grundfos de Portugal, Lisboa, (66 pg).

FEITOSA, A.C. & MANOEL FILHO, J. (2000). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Fortaleza, (391 pg). 2000.

JORBA, A.F. & ROCHA, G.A. (1982). Manual de operação e manutenção de poços, DAEE – Departamento de águas e Energia Elétrica, São Paulo. (2ª. Edição – 90 pg). 1982.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA. (1971). **Cartas 1:50.000, Ibaté e São Carlos**. Ministério do Planejamento e Coordenação Geral. Fundação IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia. Aerofotografias de 1965, reambulação de 1968 e restituição de 1971.

IG – INSTITUTO GEOLÓGICO. (2004). Sistema de Informação para o gerenciamento ambiental dos recursos hídricos subterrâneos na área de afloramento do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. Relatório Técnico. Cooperação técnica entre a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo e a Secretaria de Meio Ambiente, Saúde Pública e Proteção ao Consumidor do Estado da Baviera. São Paulo. 2004. Disponível on line em <http://www.igeologico.sp.gov.br/>. Acesso em 28/04/2004..

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. (1981). Mapa geológico do Estado de São Paulo (1:500.000).- São Paul. PT, 2 V.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. (2000). **Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Tietê / Jacaré**. UGRHI 13. Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê / Jacaré – CBH TJ. Fundo Estadual de Recursos Hídricos – FEHIDRO. Minuta disponível on line em. Acesso em 14/11/2004.

KRUSEMAN, G.P. & RIDDER, N.A. (1994). Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen. (377 pg). Netherlands. 1994.

LÜDECKE, A. & BOLDT, H. (2004). Cut costs by water well monitoring. World Pumps 2004. Feature submersible pumps. Elsevier Ltd. Disponível on line em: <http://www.ksb.com.br>, acesso em 01/11/2004.

MACHADO NETO, J.G.O. e TSUTIYA, M.T. (1993). Estudo técnico-econômico para determinação da vazão de exploração de poços tubulares profundos em sistemas de abastecimento de água. **In:** Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 17., 1993, Natal - RN. p.120-140.

MELLO, C.R. de, (1999). **Avaliação da utilização do inversor de frequência em sistemas de bombeamento para irrigação**. 85p. Dissertação de Mestrado – Irrigação e Drenagem. Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Lavras, Lavras. 1999.

OUGUI, J.Y. (2003). **Estudo da operação otimizada de sistema de bombeamento de água**. 145p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.

PACIFIC GAS AND ELECTRIC COMPANY. (1997). ***Agricultural pumping efficiency improvements***. Application Note. Energy efficiency information. 1997. Disponível on line em: <http://www.pge.com>, acesso em 01/11/2004.

PERRONI, J.C.A. (2003). Otimização dos sistemas de bombeamento dos poços tubulares profundos. Geowater. Araraquara. 2003

PERRONI, J.C.A. e RODRIGUES, J.M. (2004) Otimização de custos de bombeamento em poços profundos de Araraquara – SP. ***In: X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004. ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. Cuiabá – MT. 2004.***

PFEIFFER, S.C. e CHAUDHRY, F.H. (1993). Caracterização da qualidade das águas do Aquífero Botucatu na região urbana de São Carlos SP. ***In: Congresso Brasileiro de Recursos Hídricos do Cone Sul 10., 1993. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Gramado – RS. p.510-519. 1993.***

PORTO, R.M. (1999). Hidráulica básica. 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 1999.

QUALITY TONNES, (2004). ***Energy Efficiency Improvements in Municipal Water Utilities in Kamataka, India***. Project Design Document. Disponível on line em: www.qualitytonnes.com Acesso em 30/10/2004.

REIS, L.F.R., RIBEIRO, G.P. e CHAUDHRY, F.H. (2000). Cost allocation in reservoir-groundwater well subsystems under optimised operation. In: International Symposium CWS 2000: Water Network Modelling for Optimal Design and Management. Proceedings. Centre for Water Systems, University of Exeter, Exeter, UK, p.181-191. Edited by Godfrey Walters and Dragan Savic, ISBN 0-9539140-0-3.

RIBEIRO, G.P., (2000). ***Custos de produção de águas subterrâneas com operação otimizada via algoritmos genéticos para o abastecimento urbano de Araraquara – SP***. Dissertação de Mestrado, Depto de Hidráulica e Saneamento EESC – USP, (220 pg). 2000.

SEREC (1989). ***Plano diretor do sistema de abastecimento de água de São Carlos - SP***. Relatório técnico. SEREC – Serviços de Engenharia Consultiva Ltda. 1989.

SNIS. (2004). ***Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2002***. Serviço Nacional de Informações sobre Saneamento, Programa de Modernização do Setor de Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades. Disponível on-line em http://www.snis.gov.br/diag_2002.htm. Acesso em 16/02/2004.

TSUTIYA, M.T. (2001). Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. 185p. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES Seção São Paulo, São Paulo, 1ª. Edição. 2001.

WAGNER, K. (2000). How to save energy and analyse life cycle costs. Techno Digest. Applications 2 Issue june 2000. KSB Aktiengesellschaft. Frankenthal. Germany. 2000. Disponível on line em <http://www.ksb.com.br>, acesso em 01/11/2004.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS COMPLEMENTARES

CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M.R. (1976). Hidrología subterránea. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, (2 vols. 2.359 pg).

DRISCOLL, G.F., (1989). Groundwater and Wells. 2nd ed. St. Paul, Minn.: Johnson Division, (1089 pg). 1989.

ROSCOE MOSS COMPANY. (1990). Handbook of ground water development. New York: John Wiley & Sons, (493 pg). 1990.

SILVA, R.B.G. (1983). Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, USP-IG, (133 pg), São Paulo. 1983.