**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**
**ESCOLA DE ENGENHARIA**
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Renata Pio Maximila**

# REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS POR NANOFILTRAÇÃO: COMPARATIVO DOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO COM SISTEMA CONVENCIONAL

Porto Alegre
novembro 2016

**RENATA PIO MAXIMILA**

# REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS POR NANOFILTRAÇÃO: COMPARATIVO DOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO COM SISTEMA CONVENCIONAL

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Antônio Domingues Benetti**

Porto Alegre

novembro 2016

**RENATA PIO MAXIMILA**

# REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS POR NANOFILTRAÇÃO: COMPARATIVO DOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO COM SISTEMA CONVENCIONAL

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação (COMGRAD) da Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, novembro de 2016

Prof. Antônio Domingues Benetti
Dr. pela Cornell University, EUA
Orientador

Prof. Gino Roberto Gehling
Dr. pela Universitat Politécica de Catalunya
Relator

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Renato Machado (PUC/RS - CORSAN)**
Dr. em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP

**Prof. Gino Roberto Gehling (UFRGS)**
Dr. em Engenharia Ambiental pela Universitat Politécica de Catalunya

**Prof. Antônio Domingues Benetti (UFRGS)**
Dr. em Engenharia Civil e Ambiental pela Cornell University, EUA

Dedico este trabalho a meus pais, Renato (*in memoriam*) e
Maria Belenice, que sempre me apoiaram e incentivaram
para alcançar os meus objetivos.

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por servir de consolo e motivação nos momentos difíceis encontrados ao longo desta jornada.

Agradeço ao Prof. Antônio Domingues Benetti, orientador deste trabalho, pelo seu conhecimento, pela sua disponibilidade e pela sua atenção, imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Agradeço aos componentes da banca pelas contribuições e pelo tempo dedicado a análise deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Renato (*in memoriam*) e Maria Belenice, pelo amor incondicional, pelo exemplo de pessoas que tento me espelhar. Agradeço aos meus irmãos pelo carinho, amor e amizade.

Agradeço à minha chefe Engª Josana de Cândido e aos meus colegas de departamento pela paciência, compreensão quando precisei dedicar-me aos estudos. Agradeço ao colega Engº Renato Machado pela atenção e disposição em ajudar sempre que precisava. Agradeço a todos os colegas da CORSAN pela amizade, compreensão e disposição em ajudar sempre que precisava.

Mais fácil me foi encontrar as leis com que se movem os corpos celestes, que estão a milhões de quilômetros, do que definir as leis do movimento da água, que escoa frente aos meus olhos.

*Galileu Galilei*

# RESUMO

O ferro e o manganês, quando presentes na água de abastecimento público, causam rejeição por parte dos consumidores devido a cor e o sabor desagradável. A presença desses metais também geram inconvenientes em adutoras e redes de distribuição. Eles formam incrustações nas paredes das tubulações reduzindo a capacidade de escoamento. Assim, o presente trabalho trata sobre a comparação dos custos de implantação entre os processos de filtração por membrana do tipo nanofiltração e o tratamento convencional de oxidação por aeração seguida de filtração para a remoção de ferro e manganês presentes nas águas subterrâneas do município de Capivari do Sul/RS. Primeiramente, através da revisão bibliográfica foram abordados os diversos processos de tratamento para a remoção de ferro e de manganês nas águas de abastecimento. Posteriormente, foi analisado os parâmetros e as características da água destinada ao abastecimento do município de Capivari do Sul/RS, como também, o Projeto Executivo do Sistema de Abastecimento de Água desenvolvido pela CORSAN. A caracterização da membrana de nanofiltração, para obter os custos de implantação, foi embasada pela revisão bibliográfica. Assim, a avalição dos custos de investimentos e operacionais dos sistemas propostos foram obtidos através do orçamento desenvolvido pela CORSAN e através de consulta a empresa especializada. A comparação econômica foi desenvolvida pelo método do Valor Presente Líquido (VPL) e pela análise do Custo Marginal. Através dos resultados, pode-se verificar que os processos de separação por membranas possuem grande potencial econômico para a utilização dessa tecnologia no tratamento de água para abastecimento.

Palavras-chave: Remoção de Ferro e Manganês. Oxidação.
Aeração e Filtração. Nanofiltração. Custos de Implantação.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das etapas de delineamento do trabalho ..... 17
Figura 2 – Desenho esquemático do processo de separação por membranas ..... 35
Figura 3 – Classificação das membranas e dimensão das partículas retidas ..... 36
Figura 4 – Esquema de filtração frontal (*dead-end*) e tangencial (*cross-flow*) ..... 37
Figura 5 – Esquema da formação do fenômeno da concentração-polarização ..... 40
Figura 6 – Desenho esquemático do funcionamento de filtração ..... 43
Figura 7 – Comparativo dos ensaios em relação às concentrações médias do ferro ..... 49
Figura 8 – Comparativo dos ensaios em relação às concentrações médias do manganês 49
Figura 9 – Localização de Capivari do Sul ..... 50
Figura 10 – Mapa hidrogeológico ..... 51
Figura 11 – Sistema produtor existente e provisório ..... 52
Figura 12 – Sistema produtor projetado ..... 54
Figura 13 – Configuração do sistema de nanofiltração ..... 56
Figura 14 – Módulo do sistema de nanofiltração ..... 57
Figura 15 – Comparação dos custos de investimento ..... 62
Figura 16 – Comparação dos custos de operação ..... 65

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Semi-reação e potencial de oxidação ..... 26
Tabela 2 – Processos de separação por membranas ..... 36
Tabela 3 – Valores típicos de fluxo de água em membranas ..... 39
Tabela 4 – Ensaio Físico-Químico do Poço CPV-01 realizado em 2014 à 2016 ..... 46
Tabela 5 – Ensaio Físico-Químico do Poço CPV-02 realizado em novembro de 2009 .. 47
Tabela 6 – Ensaio Físico-Químico da água tratada realizado em 2014 à 2016 ..... 48
Tabela 7 – Principais características da membrana selecionada ..... 56
Tabela 8 – Vida útil de alguns itens..... 58
Tabela 9 – Custos de investimento para o sistema convencional ..... 61
Tabela 10 – Custos de investimento para o sistema de nanofiltração ..... 61
Tabela 11 – Comparação dos custos de investimento ..... 62
Tabela 12– Custo anual operacional para o sistema convencional ..... 63
Tabela 13– Custo anual operacional para o sistema de nanofiltração ..... 64
Tabela 14 – Valor presente dos custos de investimento e operacionais dos sistemas ..... 66

# LISTA DE SIGLAS

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento

VMP – Valor Máximo Permitido

PSM – Processos de Separação por Membranas

MF – Microfiltração

UF – Ultrafiltração

NF – Nanofiltração

OR – Osmose Reversa

PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico

SAA – Sistema de Abastecimento de Água

ETA – Estação de Tratamento de Água

EAB – Elevatória de Água Bruta

EAT – Elevatória de Água Tratada

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

VPL – Valor Presente Líquido

# LISTA DE SÍMBOLOS

$E°$ – Potencial elétrico de oxidação

$e^-$ – elétrons

J – fluxo de água através da membrana

$Q_p$ – vazão do permeado

$A_m$ – área da membrana

$L_v$ – permeabilidade hidráulica

$P_f$ – pressão de operação da membrana

r – rejeição

$C_p$ – concentração do composto no permeado

$C_a$ – concentração do composto na alimentação

VPL – valor presente líquido

X – valor de investimento e/ou valor dos gastos com operação e manutenção

i – taxa de retorno de capital

n – horizonte de planejamento

CM – custo marginal

$VPL_{inv}$ – valor presente líquido de investimento

$VPL_{op}$ – valor presente líquido de operação

$VP_{VP}$ – valor presente de volume produzido de água

# SUMÁRIO

**1 INTRODUÇÃO** ..... 13
**2 DIRETRIZES DA PESQUISA** ..... 15
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA ..... 15
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO ..... 15
**2.2.1 Objetivo principal** ..... 15
**2.2.2 Objetivos secundários** ..... 15
2.3 HIPÓTESE ..... 16
2.4 PREMISSA ..... 16
2.5 DELIMITAÇÕES ..... 16
2.6 DELINEAMENTO ..... 16
**3 FERRO E MANGANÊS EM ÁGUAS BRUTAS UTILIZADAS PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO** ..... 19
3.1 FERRO ..... 19
3.2 MANGANÊS ..... 21
3.3 PADRÕES DE POTABILIDADE ..... 21
**4 REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS** ..... 23
4.1 AERAÇÃO, SEDIMENTAÇÃO E FILTRAÇÃO ..... 23
4.2 OXIDAÇÃO QUÍMICA E FILTRAÇÃO ..... 24
**4.2.1 Potencial elétrico das reações de oxidação** ..... 25
4.2.1.1 Oxidação do ferro ..... 26
4.2.1.2 Oxidação do manganês ..... 29
4.3 TROCA IÔNICA ..... 32
4.4 ESTABILIZAÇÃO COM POLIFOSFATO ..... 32
4.5 ZEÓLITO ..... 33
**5 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS** ..... 34
5.1 CARACTERÍSTICAS DAS MEMBRANAS ..... 34
5.2 OPERAÇÃO DE SISTEMA DE MEMBRANAS ..... 36
5.3 PARÂMETROS BÁSICOS DE PROJETOS ..... 38
5.4 CONCENTRAÇÃO-POLARIZAÇÃO E *FOULING* ..... 40
5.5 LIMPEZA DAS MEMBRANAS ..... 41
**6 MEMBRANAS DE NANOFILTRAÇÃO** ..... 42
**7 METODOLOGIA DA PESQUISA** ..... 45
**8 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE CAPIVARI DO SUL** .. 46

**9 SISTEMA DE PRODUÇÃO DE ÁGUA DE CAPIVARI DO SUL** ..... 50
9.1 EXISTENTE ..... 51
9.2 PROJETO ..... 53
**10 PROJETO DO SISTEMA DE NANOFILTRAÇÃO** ..... 55
**11 AVALIAÇÃO DOS CUSTOS** ..... 58
**12 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS** ..... 61
**13 CONSIDERAÇÕES FINAIS** ..... 68
REFERÊNCIAS ..... 70
ANEXO A ..... 73
ANEXO B ..... 77
ANEXO C ..... 81

# 1 INTRODUÇÃO

A água é um dos elementos fundamentais para a sobrevivência dos seres vivos. Entretanto ela não é encontrada na natureza na sua forma que possa ser consumida, sendo necessário transformá-la em potável para o consumo humano. A qualidade da água é determinada através dos parâmetros físicos, químicos, biológicos e radiológicos definidos pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde.

O ferro e o manganês geralmente são encontrados juntos na natureza, de origem da dissolução de compostos de rochas e solos. Ambos os elementos são importantes aos seres vivos, embora quando presentes na água de abastecimento público, geram alguns inconvenientes tanto nas adutoras e nas redes de distribuição formando incrustações nas paredes das tubulações diminuindo, assim, a capacidade de escoamento; como também rejeição por parte dos consumidores, devido à presença de cor e sabor desagradáveis na água. Ainda podem causar manchas em roupas, aparelhos sanitários e utensílios domésticos; também afetam alguns processos industriais (fabricação de papel, tecido, tinturarias e bebidas).

Os processos conhecidos para o controle ou a remoção do ferro e manganês das águas destinadas ao abastecimento público são: formação de precipitado e filtração, troca iônica, estabilização com polifosfato, e através de um meio filtrante à base de zeólitos. O processo de oxidação para a formação de precipitado é realizado através da aeração ou utilizando oxidantes químicos como, por exemplo, o permanganato de potássio, o cloro e o dióxido de cloro (SAMPAIO, 1995). Porém, o potencial elétrico das reações de oxidação-redução varia conforme a utilização do agente oxidante empregado.

A seleção da tecnologia mais adequada e econômica para a remoção dos metais deve ser determinada considerando diversos fatores. Sendo assim novas técnicas vem sendo empregadas no tratamento de água, como, por exemplo, a separação por membranas de micro, ultra, nanofiltração e osmose reversa. Os processos de separação por membranas, na área de saneamento básico, foram inicialmente projetados para a dessalinização de água do mar por sistemas de osmose reversa.

As membranas são tecnologias capazes de separar substâncias que o tratamento convencional não consegue reter. Por possuírem porosidade variada, as membranas servem tanto para a separação de partículas como para a separação molecular. Elas são barreiras físicas capazes de controlar ou reter a passagem de componentes indesejáveis (SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001).

A nanofiltração é capaz de separar moléculas de massa molar entre 500 e 2.000 Dalton e tem condições de trabalhar com pressões mais baixas, quando comparada com as membranas de osmose reversa (HABERT et. al., 2006). A tecnologia da nanofiltração apresenta grande potencial para a remoção de matéria orgânica dissolvida, moléculas de cátions e ânions divalentes (FERREIRA, 2010).

Dessa forma, o presente trabalho comparou os custos de implantação entre o emprego de nanofiltração e das técnicas convencionais de remoção de ferro e manganês das águas subterrâneas do município de Capivari do Sul/RS utilizadas atualmente.

No capítulo 2, encontram-se as diretrizes da pesquisa, ou seja, a questão de pesquisa, os objetivos, a hipótese, a premissa, as delimitações e o delineamento. A revisão bibliográfica, apresentada nos capítulos 3, 4, 5 e 6, aborda conceitos e métodos de tratamento de água para a remoção de ferro e manganês.

No capítulo 7, é feita uma descrição da metodologia do trabalho. No capítulo 8, é apresentado as características da água subterrânea que serve para o abastecimento do município de Capivari do Sul. No capítulo 9, encontra-se a descrição do sistema de produção de água existente e projetado pela CORSAN para o abastecimento de água do município.

O capítulo 10 traz a caracterização da membrana e do sistema projetado para a nanofiltração. No capítulo 11, através da avaliação de custos, é apresentado a descrição do levantamento dos custos de investimento e operação dos sistemas de tratamento convencional e de nanofiltração. Nos capítulos 12 e 13 são apresentados, respectivamente, os resultados e as considerações finais da comparação dos custos de investimento e de operação para os sistemas de tratamento convencional e de nanofiltração para a remoção do ferro e manganês.

# 2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Para a elaboração do presente trabalho foram definidas as seguintes diretrizes para o desenvolvimento da pesquisa, as quais são apresentadas nos próximos itens.

## 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: a implantação de sistemas de membranas por nanofiltração comparado ao tratamento convencional para a remoção de ferro e manganês das águas subterrâneas da cidade de Capivari do Sul é economicamente viável?

## 2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são descritos nos itens a seguir.

### 2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é comparar os custos de implantação entre a nanofiltração e a oxidação por aeração seguida de filtração para as remoções de ferro e de manganês presentes nas águas subterrâneas do município de Capivari do Sul.

### 2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

a) caracterizar a água subterrânea a ser tratada em função das concentrações de ferro e manganês presentes;
b) determinar e caracterizar a membrana de nanofiltração a ser utilizada para a remoção do ferro e do manganês;
c) estimar o custo de implantação do sistema com a nanofiltração; e
d) estimar o custo de operação e manutenção considerando o horizonte de projeto.

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que há viabilidade econômica no emprego de nanofiltração para a remoção de ferro e de manganês presentes em águas subterrâneas em comparação com o processo de aeração a ser implantado no município de Capivari do Sul.

## 2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa a grande resistência por parte dos projetistas da área de saneamento básico na utilização de novas tecnologias, como membranas filtrantes, para o tratamento de água.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

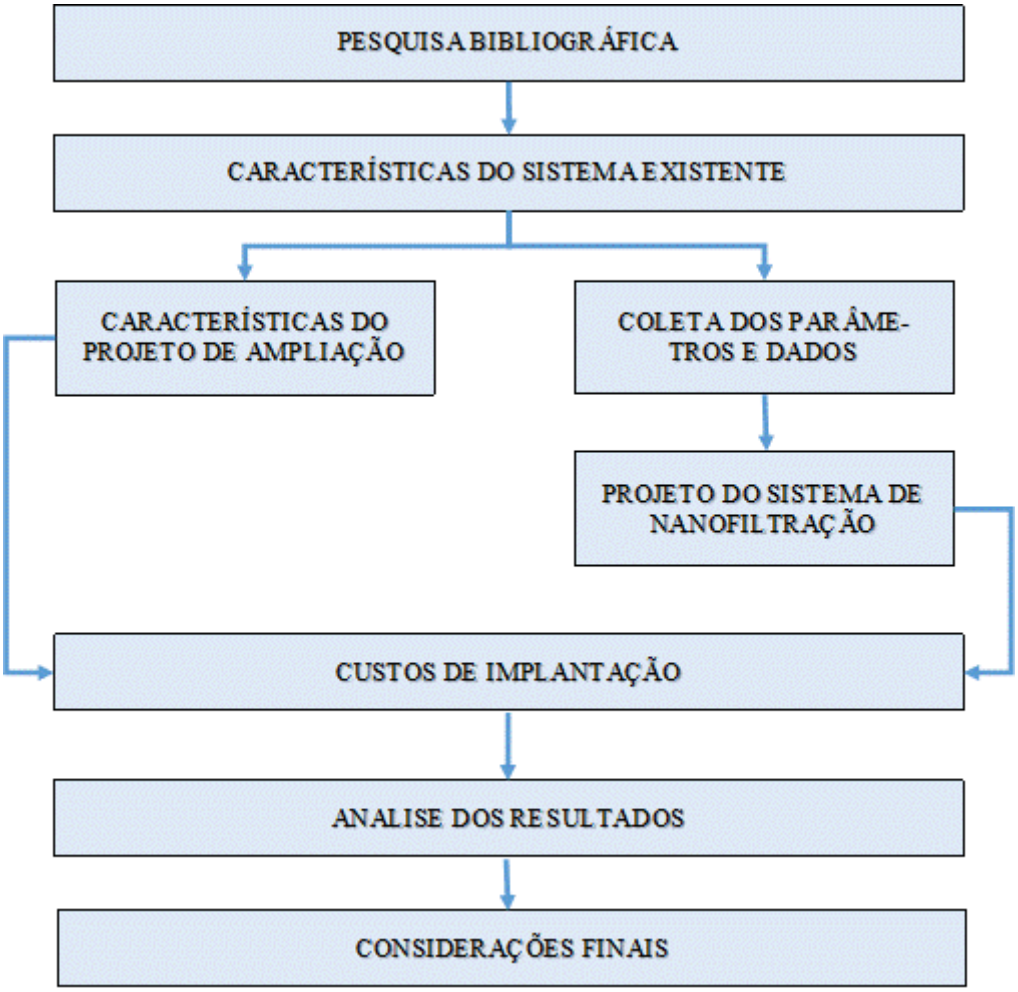
A pesquisa está delimitada ao estudo dos custos de implantação de sistemas de membranas de nanofiltração comparativamente ao processo de aeração seguida de filtração para a remoção de ferro e manganês presentes nas águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público da cidade de Capivari do Sul/RS.

## 2.6 DELINEAMENTO

Com base no fluxograma apresentado na figura 1, as etapas da realização deste trabalho foram definidas da seguinte forma, as quais são descritas nos próximos parágrafos:

a) pesquisa bibliográfica;
b) características do sistema existente;
c) caracterização do projeto de ampliação;
d) coleta dos parâmetros e dados;
e) projeto do sistema de nanofiltração;
f) custos de implantação;
g) análise dos resultados; e
h) considerações finais.

Figura 1 – Fluxograma das etapas de delineamento do trabalho




(fonte: elaborado pelo autor)

A pesquisa bibliográfica foi desenvolvida ao longo de todo o trabalho, mas com maior intensidade nas etapas iniciais, buscando aprimorar o embasamento teórico de assuntos pertinentes ao tema do trabalho.

Na etapa seguinte foram caracterizados o sistema existente e o projeto de ampliação da produção de água do município de Capivari do Sul para a melhor compreensão do objetivo do trabalho. Portanto, foram analisadas as necessidades de buscar novas tecnologias mais adequadas e econômicas para o tratamento de água.

Após a compreensão do sistema estudado, foram buscados os parâmetros e dados que permitem analisa-los para a melhor definição da água bruta tratada e, também, da melhor caracterização da membrana.

Sequencialmente foi realizado o estudo dos dados fundamentais para a elaboração correta do projeto e dimensionamento do sistema de nanofiltração. Na etapa de planejamento do projeto foram executadas as ações específicas para o cálculo da caracterização do sistema de remoção do ferro e manganês por nanofiltração.

A seguir, foi feita a avaliação dos custos de implantação do sistema de tratamento de água por nanofiltração. Também foi realizada a comparação dos resultados entre os processos de tratamento, sempre buscando identificar a melhor alternativa sob o ponto de vista econômico.

# 3 FERRO E MANGANÊS EM ÁGUAS BRUTAS UTILIZADAS PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO

As características das águas naturais, segundo Libânio (2010), são definidas em função de diversos processos que ocorrem no corpo hídrico e na bacia hidrográfica. A água natural não é encontrada na natureza na sua forma absolutamente pura, entretanto para o consumo humano é necessário que ela seja potável.

As impurezas acumuladas na água, durante seu ciclo hidrológico e decorrente das atividades humanas, são avaliadas por diversos parâmetros físicos, químicos, biológicos e radiológicos, cujos limites aceitáveis ao consumo humano são fixados pela Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

Conforme Richter (2009), o ferro e o manganês são metais encontrados frequentemente associados na natureza originários da dissolução de compostos de rochas e solos. Ambos os elementos são necessários à nutrição humana, e, quando presentes na água para abastecimento público, provocam problemas de rejeição por parte dos consumidores, devido à cor e ao sabor desagradáveis.

Nos itens seguintes são apresentadas as informações relacionadas com a presença de ferro e manganês nas águas brutas utilizadas para abastecimento público.

## 3.1 FERRO

O ferro é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre, tendo a sua origem na dissolução de compostos de rochas e solos. Os compostos de ferro podem ser encontrados nas águas naturais, superficiais e subterrâneas nas formas insolúveis ($Fe^{+3}$) e solúveis ($Fe^{+2}$) (LIBÂNIO, 2010).

Di Bernardo e Sabogal (2008) afirmam que em águas subterrâneas com quantidade suficiente de gás carbônico dissolvido, os carbonatos podem ser dissolvidos, originando bicarbonato ou sulfato ferroso. Para Richter (2009), as formas solúveis do ferro são oxidadas facilmente nas

águas naturais de superfície, formando hidróxidos insolúveis, e como consequência tendem a precipitar. Portanto, em águas superficiais bem aeradas dificilmente é encontrado ferro em concentrações elevadas.

Pela Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), a concentração máxima de ferro é estabelecida em 0,3 mg/L, pois concentrações superiores a esta pode gerar rejeição por parte dos consumidores.

A adoção de águas contendo ferro oxidado pode gerar alguns inconvenientes elencados a seguir (DI BERNARDO; SAGOBAL, 2008):

a) proliferação de microrganismos, denominados ferrobactérias, pode elevar a demanda de desinfetante;
b) formação de precipitado coloidal que gera incrustações nas paredes das tubulações, reduzindo a capacidade de escoamento das adutoras e das redes de distribuição;
c) alteração das características organolépticas da água de consumo conferindo à mesma um sabor amargo e adstringente, como, também, tornando-a turva e levemente colorida;
d) contribuição, em concentrações altas, para a dureza da água, causando manchas em roupas, aparelhos sanitários e em objetos de porcelana; e
e) intervenção dos processos industriais de fabricação de papel, tecido, tinturarias e bebidas.

Destaca-se que a presença de ferro na água em concentrações habituais, não causa risco à saúde do consumidor. Entretanto, em indivíduos mais susceptíveis pode gerar acúmulo de altas concentrações no fígado e no pâncreas (DI BERNARDO; SAGOBAL, 2008).

O ferro é facilmente removido através de tratamento adequado. Em águas subterrâneas, a remoção de ferro se dá por processos de oxidação (aeração) e filtração precedida de ajuste do pH, enquanto que em águas superficiais sua remoção é realizada por coagulação. Com alguma frequência, o ferro presente em águas superficiais pode apresentar-se complexado à matéria orgânica o que dificulta a remoção, sendo necessária a pré-oxidação da água bruta (DI BERNARDO; SAGOBAL, 2008; RICHTER, 2009).

## 3.2 MANGANÊS

O manganês também é um elemento importante para a vida dos seres vivos. Embora menos presente na natureza, o manganês surge naturalmente na água através da dissolução de minerais, e, quando encontrado, apresenta-se geralmente associado ao ferro. Também pode ser encontrado nas formas solúveis ($Mn^{+2}$) e insolúveis ($Mn^{+3}$ e $Mn^{+4}$) (DI BERNARDO; SABOGAL, 2008).

Segundo Richter (2009), o manganês é dissolvido em águas subterrâneas com alto índice de gás carbônico, com baixo pH e com baixa concentração de oxigênio dissolvido. Em águas superficiais, o manganês pode ser oxidado tendendo a ser precipitado. Da mesma forma que o ferro, o manganês pode ser removido da água destinada ao abastecimento por oxidação.

O manganês oxidado apresenta os mesmos inconvenientes que o ferro. Também não gera risco à saúde humana nas condições de aceitabilidade da água (DI BERNARDO; SABOGAL, 2008).

## 3.3 PADRÕES DE POTABILIDADE

A qualidade da água potável no Brasil é regulada pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde. Além do padrão de potabilidade, a Portaria estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011).

A água potável, segundo a Portaria, deve atender ao padrão de potabilidade e não oferecer risco à saúde do consumidor. Ela deve estar em conformidade com padrões microbiológicos, radiológicos, químicos e organolépticos (BRASIL, 2011).

Entre os diversos parâmetros organolépticos contemplados na Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde estabelece os valores máximos permitidos (VMP) para o ferro e o manganês em, respectivamente, 0,3 e 0,1 mg/L. Todavia, valores superiores ao VMPs são aceitos desde que os as concentrações de ferro e manganês não ultrapassem a 2,4 e 0,4 mg/L, respectivamente, quando complexados à produtos químicos de baixo risco à saúde humana (BRASIL, 2011).

Segundo Richter (2009), as limitações para as concentrações do ferro e do manganês são estabelecidas mais pelo inconveniente estético e econômico do que significado sanitário, visto que não causam risco à saúde humana. Libânio (2010) cita que concentrações superiores à 0,01 mg/L provocam sabor adstringente à água. E concentrações acima de 0,05 mg/L favorecem o aparecimento de manchas em roupas e objetos de porcelana.

# 4 REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS

Richter (2009) afirma que existem diversos métodos para a remoção do ferro e manganês de águas destinadas ao abastecimento público. O método mais utilizado para a remoção destes elementos é a oxidação, com adequação do pH, seguida de filtração.

Entretanto Sampaio (1995) cita os seguintes processos para o controle ou a remoção dos compostos de ferro e de manganês:

a) formação de precipitado e filtração,
   - aeração, sedimentação e filtração (com ou sem adição de cloro e alcalinizante para ajuste do pH);
   - oxidação com permanganato de potássio, cloro, dióxido de cloro, ozônio ou peróxido de hidrogênio seguida da filtração (com ou sem adição de alcalinizante);

b) troca iônica;

c) estabilização com polifosfatos; e

d) zeólito de manganês.

Para Ramos (2010), a seleção de processo mais econômico e efetivo para remoção dos metais é determinada pela capacidade da instalação de tratamento, pH da água e a presença de outros contaminantes.

As técnicas habitualmente utilizadas em saneamento para controle e remoção de ferro e de manganês são comentadas nos próximos tópicos.

## 4.1 AERAÇÃO, SEDIMENTAÇÃO E FILTRAÇÃO

Segundo Moruzzi e Reali (2012), o objetivo da aeração consiste em introduzir oxigênio da atmosfera na água para reagir com o ferro e o manganês presentes. Essa reação produz compostos ferrosos e manganosos.

Madeira (2003) recomenda o emprego das seguintes configurações de aeração-filtração:

a) aeração e filtração: indicado para águas alcalinas (pH 7,0 à 8,3) de alta concentração de ferro, porém sem presença de manganês, e baixo teor de matéria orgânica;

b) aeração, sedimentação e filtração: indicado para águas quando o teor de ferro for superior a 10 mg/L;

c) aeração, alcalinização e filtração: indicado em águas com pH baixo e com concentrações de ferro e manganês baixa;

d) aeração, alcalinização, sedimentação e filtração: indicado em águas com pH baixo e alto teor de ferro e manganês;

e) coagulação química, sedimentação e filtração: indicado em águas com presença de outras substâncias impuras; e

f) aeração, coagulação química, sedimentação e filtração: indicado quando há outras substâncias na água bruta e também compostos ferrosos além do hidróxido férrico coloidal e dos íons Fe.

A aeração geralmente é realizada em aerador de bandejas superpostas e perfuradas. Segundo Madeira (2003), o aerador de bandejas é usado em águas com concentrações de $CO_2$ inferior a 40 mg/L; para águas com teores do gás $CO_2$ mais elevados. O aerador sob pressão ou ar insuflado é recomendado quando não há $CO_2$ livre.

Segundo Moruzzi e Reali (2012), a velocidade das reações de oxidação do ferro e do manganês depende da alcalinidade e das características da água bruta. Com isso pode ser necessária a utilização de tanques de sedimentação para retenção dos compostos precipitados após a aeração. Ainda, segundo os autores, dependendo da concentração de manganês nas águas, tempos adicionais de retenção poderão ser considerados. Também pode ser requerido tratamento complementar com oxidantes químicos com o objetivo de diminuir o teor do manganês para níveis desejados.

Existem casos em que a necessidade de utilização de coagulantes químicos, como sulfato de alumínio ou sulfato férrico, é atribuída à dificuldade de floculação do hidróxido férrico ou dos íons férricos (MADEIRA; 2003).

## 4.2 OXIDAÇÃO QUÍMICA E FILTRAÇÃO

A oxidação do ferro e manganês através de produtos químicos é um processo importante para o tratamento de águas com presença desses metais. A aplicação de oxidantes diminui a concentração solúvel do metal tornando-o insolúvel, desta forma permitem a sua remoção em processos de separação do líquido (MORUZZI; REALI; 2012).

A remoção do ferro e manganês dissolvidos envolve duas etapas. A primeira etapa consiste na oxidação das espécies solúveis para espécies insolúveis com o uso de oxidantes; e a segunda, remoção dos óxidos de metais insolúveis por processos de filtração (MORUZZI; REALI, 2012).

Os principais oxidantes empregados, conforme Ramos (2010), são:

a) hipoclorito de sódio;
b) permanganato de potássio;
c) peróxido de hidrogênio; e
d) dióxido de cloro.

Ramos (2010) afirma que para valores de pH superiores a 6,5 o emprego de oxidantes causa a formação do precipitado de ferro. No caso do manganês, para ocorrer a formação do precipitado é necessário valor de pH maior que 8. Benefield e Morgan[1] (1990 apud MORUZZI; REALI, 2012) recomendam a aplicação de oxidantes antes da adição de qualquer produto químico na água.

### 4.2.1 Potencial elétrico das reações de oxidação

O potencial elétrico é utilizado para caracterizar as reações de oxidação-redução, sendo que serve para indicar a tendência de uma reação em perder ou ganhar elétrons. Assim, cada reação pode ser desdobrada em semi-reações, as quais possuem um potencial padrão E° associado (METCALF; EDDY, 2016).

Portanto, a capacidade do ferro e do manganês em serem oxidados é avaliada através do potencial elétrico das respectivas semi-reações descritas na tabela 1.

[1] BENEFIELD, L. D.; MORGAN, J. M. ***Water Quality and Treatment***. 4. ed. New York: Edited by F. W. Pontius, 1990.

Tabela 1 – Semi-reação e potencial de oxidação

| | SEMI-REAÇÃO | POTENCIAL DE OXIDAÇÃO (V) |
|---|---|---|
| Ferro | $Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$ | E° = + 0,771 |
| Manganês | $MnO_2(g) + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$ | E° = + 1,23 |
| Oxigênio | $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ | E° = + 1,23 |
| Ozônio | $O_3 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow O_2 + H_2O$ | E° = + 2,07 |
| Peróxido de hidrogênio | $H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$ | E° = + 1,78 |
| Cloro | $Cl_2(g) + 2e^- \rightarrow 2Cl^-$ | E° = + 1,36 |
| Dióxido de cloro | $ClO_2 + e^- \rightarrow ClO_2^-$ | E° = + 1,50 |
| Hipoclorito | $ClO^- + H_2O + 2e^- \rightarrow Cl^- + 2OH^-$ | E° = + 0,90 |
| Permanganato de potássio | $MnO_4^- + 4H^+ + 3e^- \rightarrow MnO_2 + 2H_2O$ | E° = + 1,67 |

(fonte: elaborado pelo autor; baseado em METCALF; EDDY, 2016)

#### 4.2.1.1 Oxidação do ferro

A capacidade dos agentes oxidantes em oxidar o ferro pode ser indicada pelo potencial elétrico das semi-reações, as quais estão apresentadas na tabela 1. Pode-se observar que o potencial de oxidação da semi-reação de redução do ferro é menor que o dos agentes oxidantes, portanto, o ferro é oxidado.

Quando o potencial elétrico (E°) da reação global for maior que zero, a reação irá ocorrer conforme escrita (METCALF; EDDY, 2016). As reações globais para cada caso são mostradas a seguir.

*a) Oxigênio*

Neste caso, a semi-reação do ferro é escrita na forma inversa e multiplicada por 4, para que o número de elétrons seja igualado à semi-reação de redução do oxigênio.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $4Fe^{2+} \rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^-$ | E° = - 0,77 V | (1) |
| Redução | $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ | E° = + 1,23 V | (2) |
| Global | $4Fe^{2+} + O_2 + 4H^+ \rightarrow 4Fe^{3+} + 2H_2O$ | E° = + 0,46 V | (3) |

Através da reação global (3) observa-se que o potencial elétrico (E°) é maior que zero, ou seja, a reação irá ocorrer conforme foi escrita. Portanto, a oxidação do ferro pelo oxigênio é favorável.

*b) Ozônio*

Como o potencial elétrico do ozônio é maior que do ferro, ocorrerá oxidação do ferro pelo ozônio.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $2Fe^{2+} \rightarrow 2Fe^{3+} + 2e^-$ | E° = - 0,77 V | (4) |
| Redução | $O_3 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow O_2 + H_2O$ | E° = + 2,07 V | (5) |
| Global | $2Fe^{2+} + O_3 + 2H^+ \rightarrow 2Fe^{3+} + O_2 + H_2O$ | E° = + 1,30 V | (6) |

A reação é favorável, tendo em vista que E° > 0, conforme escrito na reação global (6).

*c) Peróxido de hidrogênio*

Como o potencial elétrico do peróxido de hidrogênio é maior que do ferro, este será oxidado, conforme ilustra as semi-reações abaixo escritas.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $2Fe^{2+} \rightarrow 2Fe^{3+} + 2e^-$ | E° = - 0,77 V | (7) |
| Redução | $H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$ | E° = + 1,78 V | (8) |
| Global | $2Fe^{2+} + H_2O_2 + 2H^+ \rightarrow 2Fe^{3+} + 2H_2O$ | E° = + 1,01 V | (9) |

A reação global (9) mostra que a reação é favorável.

*d) Cloro*

As semi-reações utilizadas para a oxidação do ferro pelo cloro são mostradas abaixo.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $2Fe^{2+} \rightarrow 2Fe^{3+} + 2e^-$ | E° = - 0,77 V | (10) |
| Redução | $Cl_2(g) + 2e^- \rightarrow 2Cl$ | E° = + 1,36 V | (11) |
| Global | $2Fe^{2+} + Cl_2(g) \rightarrow 2Fe^{3+} + 2Cl$ | E° = + 0,59 V | (12) |

Sendo que o potencial elétrico do cloro é maior que do ferro, a oxidação deste será favorável pelo cloro como visto na reação global (12).

*e) Dióxido de cloro*

Neste caso, a semi-reação do ferro (13) é somente escrita na forma de oxidação, tendo em vista que o número de elétrons já apresenta igualado com a semi-reação de redução do dióxido de cloro (14).

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^-$ | E° = - 0,77 V | (13) |
| Redução | $ClO_2 + e^- \rightarrow ClO_2^-$ | E° = + 1,50 V | (14) |
| Global | $Fe^{2+} + ClO_2 \rightarrow Fe^{3+} + ClO_2^-$ | E° = + 0,73 V | (15) |

Através da reação global (15) observa-se que E° > 0, ou seja, a reação irá ocorrer conforme foi escrita. Portanto, a oxidação do ferro pelo dióxido de cloro é favorável.

*f) Hipoclorito*

As semi-reações utilizadas para a oxidação de ferro através do oxidante hipoclorito apresentam-se escritas abaixo.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $2Fe^{2+} \rightarrow 2Fe^{3+} + 2e^-$ | E° = - 0,77 V | (16) |
| Redução | $ClO^- + H_2O + 2e^- \rightarrow Cl^- + 2OH^-$ | E° = + 0,90 V | (17) |
| Global | $2Fe^{2+} + ClO^- + H_2O \rightarrow 2Fe^{3+} + Cl^- + 2OH^-$ | E° = + 0,13 V | (18) |

Observa-se que a reação é favorável a oxidação do ferro pelo hipoclorito.

*g) Permanganato de potássio*

Neste caso, a semi-reação do ferro também é escrita na forma inversa e multiplicada por 3 para que o número de elétrons seja igualado da semi-reação de redução do permanganato.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $3Fe^{2+} \rightarrow 3Fe^{3+} + 3e^-$ | E° = - 0,77 V | (19) |
| Redução | $MnO_4^- + 4H^+ + 3e^- \rightarrow MnO_2 + 2H_2O$ | E° = + 1,67 V | (20) |
| Global | $3Fe^{2+} + MnO_4^- + 4H^+ \rightarrow 3Fe^{3+} + MnO_2 + 2H_2O$ | E° = + 0,90 V | (21) |

Observa-se que o resultado do potencial elétrico da reação (21) é favorável para a oxidação do ferro através do permanganato de potássio.

4.2.1.2 Oxidação do manganês

A capacidade dos oxidantes em oxidar o manganês pode ser indicada pelo potencial elétrico das meias-reações. Pode-se observar através do potencial de oxidação do manganês (tabela 1), que este metal é mais difícil de oxidar do que o ferro. As reações globais para cada caso são mostradas a seguir.

*a) Oxigênio*

Neste caso, a semi-reação do manganês é escrita na forma inversa e multiplicada por 2 para que o número de elétrons seja igualado da semi-reação de redução do oxigênio.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $2Mn^{2+} + 4H_2O \rightarrow 2MnO_2(g) + 8H^+ + 4e^-$ | E° = - 1,23 V | (22) |
| Redução | $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ | E° = + 1,23 V | (23) |
| Global | $2Mn^{2+} + 2H_2O + O_2 \rightarrow 2MnO_2(g) + 4H^+$ | E° = 0,00 V | (24) |

Observa-se que o potencial elétrico das semi-reações do manganês e do oxigênio são iguais. Portanto, em condições padrões, a reação global (24) encontra-se em equilíbrio. O manganês apresenta maior dificuldade de oxidar do que o oxigênio. Para que a reação ocorra dependerá do pH e da temperatura da água.

*b) Ozônio*

Neste caso ocorrerá oxidação do manganês pelo ozônio, pois o potencial elétrico do oxidante é maior que do manganês.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $Mn^{2+} + 2H_2O \rightarrow MnO_2(g) + 4H^+ + 2e^-$ | E° = - 1,23 V | (25) |
| Redução | $O_3 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow O_2 + H_2O$ | E° = + 2,07 V | (26) |
| Global | $Mn^{2+} + H_2O + O_3 \rightarrow MnO_2(g) + 2H^+ + O_2$ | E° = + 0,84 V | (27) |

Através da reação global (27) observa-se que o potencial elétrico (E°) é maior que zero, ou seja, a reação irá ocorrer conforme foi escrita. Portanto, a oxidação do manganês pelo ozônio é favorável.

*c) Peróxido de hidrogênio*

Neste caso, a semi-reação do manganês (28) é somente escrita na forma de oxidação, tendo em vista que o número de elétrons já apresenta igualado com a semi-reação de redução do peróxido de hidrogênio (29).

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $Mn^{2+} + 2H_2O \rightarrow MnO_2(g) + 4H^+ + 2e^-$ | E° = - 1,23 V | (28) |
| Redução | $H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$ | E° = + 1,78 V | (29) |
| Global | $Mn^{2+} + H_2O_2 \rightarrow MnO_2(g) + 2H^+$ | E° = + 0,55 V | (30) |

A reação global (30) mostra que a reação é favorável a oxidação do manganês pelo peróxido de hidrogênio.

*d) Cloro*

As meias-reações utilizadas para a oxidação do manganês pelo cloro são mostradas abaixo.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $Mn^{2+} + 2H_2O \rightarrow MnO_2(g) + 4H^+ + 2e^-$ | E° = - 1,23 V | (31) |
| Redução | $Cl_2(g) + 2e^- \rightarrow 2Cl^-$ | E° = + 1,36 V | (32) |
| Global | $Mn^{2+} + Cl_2(g) + 2H_2O \rightarrow MnO_2(g) + 2Cl^- + 4H^+$ | E° = + 0,13 V | (33) |

Sendo que o potencial elétrico do cloro é maior que do manganês, portanto a oxidação do deste será favorável pelo cloro como visto na reação global (33).

*e) Dióxido de cloro*

Neste caso, a semi-reação do manganês (34) é somente escrita na forma inversa. E a semi-reação do dióxido de cloro (35) será multiplicada por 2 para igualar o número de elétrons.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $Mn^{2+} + 2H_2O \rightarrow MnO_2(g) + 4H^+ + 2e^-$ | E° = - 1,23 V | (34) |
| Redução | $2ClO_2 + 2e^- \rightarrow 2ClO_2^-$ | E° = + 1,50 V | (35) |
| Global | $Mn^{2+} + 2ClO_2 + 2H_2O \rightarrow MnO_2(g) + 2ClO_2^- + 4H^+$ | E° = + 0,27 V | (36) |

Através da reação global (36) observa-se que E° > 0, ou seja, a reação irá ocorrer conforme foi escrita. Portanto, a oxidação do manganês pelo dióxido de cloro é favorável.

*f) Hipoclorito*

As semi-reações utilizadas para a oxidação de ferro através do oxidante hipoclorito apresentam-se escritas abaixo.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $Mn^{2+} + 2H_2O \rightarrow MnO_2(g) + 4H^+ + 2e^-$ | E° = - 1,23 V | (37) |
| Redução | $ClO^- + H_2O + 2e^- \rightarrow Cl^- + 2OH^-$ | E° = + 0,90 V | (38) |
| Global | $Mn^{2+} + ClO^- + 3H_2O \rightarrow MnO_2(g) + Cl^- + 4H^+ + 2OH^-$ | E° = - 0,33 V | (39) |

Neste caso, o potencial elétrico do hipoclorito é menor que o manganês. Observa-se pela reação global (39) que E° < 0, portanto a reação não é favorável para a oxidação.

*g) Permanganato de potássio*

As semi-reações devem ser multiplicadas por 3 e 2, respectivamente nas semi-reações de oxidação do manganês (40) e na redução do permanganato de potássio (41).

| | | | |
|---|---|---|---|
| Oxidação | $3Mn^{2+} + 6H_2O \rightarrow 3MnO_2(g) + 12H^+ + 6e^-$ | E° = - 1,23 V | (40) |
| Redução | $2MnO_4^- + 8H^+ + 6e^- \rightarrow 2MnO_2 + 4H_2O$ | E° = + 1,67 V | (41) |
| Global | $3Mn^{2+} + 2MnO_4^- + 2H_2O \rightarrow 5MnO_2 + 4H^+$ | E° = + 0,44 V | (42) |

A reação é favorável, tendo em vista que E° > 0, conforme escrito na reação global (42).

## 4.3 TROCA IÔNICA

O princípio da troca iônica consiste em substituir os íons aderidos à superfície de um material sólido (resina) por íons dissolvidos na água. As resinas podem apresentar material natural ou sintético (METCALF; EDDY, 2016).

As propriedades mais relevantes das resinas de troca iônica, segundo Metcalf e Eddy (2016), são: a capacidade de íons que podem ser trocados, o tamanho da partícula da resina, a capacidade de regeneração e a estabilidade das resinas o qual define o seu desempenho a longo prazo.

Moruzzi e Reali (2012) recomendam a utilização da troca iônica para a remoção de ferro e manganês quando a concentração destes metais é considerada baixa, ou seja, menor que 0,5 mg/L.

Segundo Madeira (2003), na troca iônica, o oxigênio deve ser eliminado para prevenir a oxidação de óxido de ferro, o que forma um precipitado e colmatação da coluna de troca iônica.

## 4.4 ESTABILIZAÇÃO COM POLIFOSFATO

Os polifosfatos são considerados inibidores corrosivos. Segundo Rubim (2012), os polifosfatos, quando empregados em águas com pH na faixa neutra a alcalina, são convertidos em ortofosfatos. Os ortofosfatos atuam para sequestrar metais mantendo-os solúveis na água.

A utilização de polifosfatos tem como objetivo formar uma camada protetora e controlar os efeitos da oxidação. Consequentemente inibem a formação de incrustações nas paredes das tubulações causadas pela presença de ferro e manganês na água (LIBÂNIO, 2010).

## 4.5 ZEÓLITO

A remoção de ferro e manganês através de um meio filtrante à base de zeólitos naturais ou sintéticos baseia-se no processo de oxidação e/ou adsorção (ALVES, 2008).

Madeira (2003) apresenta leitos filtrantes constituídos com grãos de zeólito de sódio sob uma camada de óxido de manganês, o qual converte o ferro ou o manganês em compostos férricos ou mangânicos insolúveis. O autor recomenda a utilização desse tipo de leito quando a concentração de ferro e manganês for inferior a 2 mg/L e sem a presença de matéria orgânica.

# 5 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Os processos de separação por membranas (PSM) foram introduzidos na área de saneamento no início da década de 60, em projetos de dessalinização de água do mar, na forma de sistemas de osmose reversa. Schneider e Tsutiya (2001) explicam que nas décadas seguintes começou a aplicação de membranas de nanofiltração para a remoção de dureza de águas subterrâneas no estado da Flórida nos EUA, e remoção de cor em águas derivadas de zonas turfas da Noruega.

Ainda segundo os autores, foi durante os anos 90 que as membranas tiveram um grande avanço tecnológico na área de saneamento básico com o lançamento de membranas de separação de partículas (microfiltração e ultrafiltração).

Para Libânio (2010), os principais fatores que impulsionam a adoção da tecnologia de membranas são:

a) redução de custo de construção e operação;
b) diminuição do uso de produtos químicos durante o processo de tratamento;
c) alta qualidade da água produzida; e
d) facilidade de ampliação dos sistemas por serem modulares.

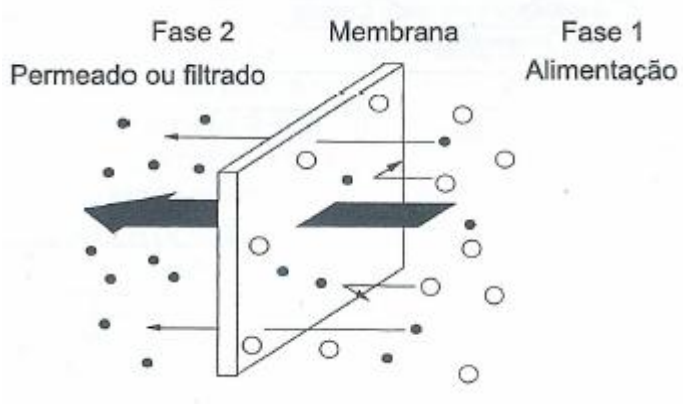
Os processos de separação por membranas não se restringem somente à área de tratamento de água para abastecimento público. Também possuem uma grande contribuição para o tratamento de efluentes, reuso de águas e recarga de aquíferos (SCHLEICHER, 2013).

## 5.1 CARACTERÍSTICAS DAS MEMBRANAS

Libânio (2010) define membrana como uma fina camada que separa duas soluções com a finalidade de barrar o transporte de substâncias presentes nestas soluções quando aplicada uma força externa, ou seja, são sistemas de separação de materiais, pois não ocorre transformação química ou biológica dos componentes durante o processo de filtração. As forças externas que impulsionam a filtração nas membranas utilizadas em tratamento de água

para consumo humano são pressão ou sucção (pressão negativa). A figura 2 ilustra o processo de separação por membranas.

Figura 2 – Desenho esquemático do processo de separação por membranas



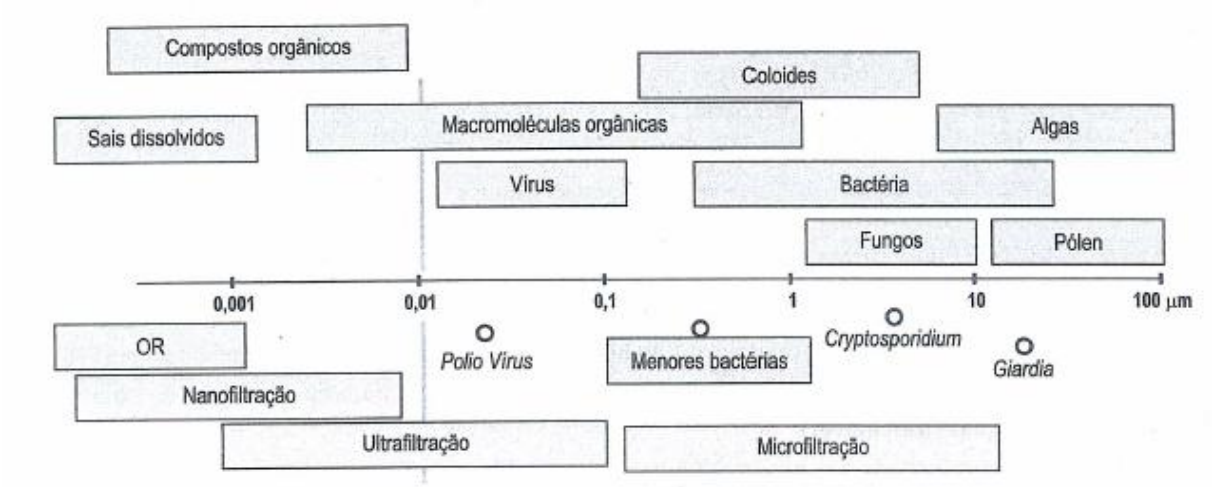

(fonte: Schneider e Tsutiya, 2001)

As membranas podem ser classificadas de acordo com o mecanismo de separação, morfologia física e natureza química. Di Bernardo et al. (2010) classificam em relação ao mecanismo de separação em densas ou porosas. O emprego de um ou de outro tipo de membrana é, principalmente, pelo objetivo do tratamento. As membranas densas e porosas podem ainda ser classificadas como isotrópicas ou anisotrópicas, isto é, podem ou não apresentar as mesmas características morfológicas ao longo de sua espessura. Além dessas classificações, também podem ser divididas em orgânicas (polímeros) ou inorgânicas (cerâmicas, vidros, metais).

As membranas porosas são classificadas conforme a distribuição e o tamanho dos poros, os quais determinam o material a ser filtrado pela membrana. Sendo assim, segundo Schneider e Tsutiya (2001), as membranas empregadas na área de saneamento básico são: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (OR). A figura 3 apresenta a classificação das membranas conforme a dimensão do material retido.

Segundo Schleicher (2013), a escolha da disposição da membrana envolve vários aspectos: simplicidade de operação, tipo de lavagem empregada e espaço físico disponível para o sistema. É feita a opção por membranas que maximizem a área superficial por unidade de volume, resultando em módulos compactos. Os principais módulos comercializados são: com placas, tubulares, espirais, com fibras ocas e com discos rotatórios.

Figura 3 – Classificação das membranas e dimensão das partículas retidas




(fonte: Libânio, 2010)

Os processos de separação por membranas, que utilizam a força-motriz como gradiente de pressão, empregam membranas cada vez mais densas o que permite remover compostos e substâncias com massa e dimensões progressivamente menores. Portanto, o gradiente de pressão cresce inversamente à redução dos poros (SCHLEICHER, 2013). Os diversos tipos de processos de separação empregando gradientes de pressão estão resumidos na tabela 2.

Tabela 2 – Processos de separação por membranas

| PROCESSOS | PRESSÃO (kPa) | POROS (mm) |
|---|---|---|
| Microfiltração | 50 - 200 | 0,1 – 5 |
| Ultrafiltração | 100 – 700 | 0,001 – 0,1 |
| Nanofiltração | 500 – 2.500 | 0,001 - 0,002 |
| Osmose Reversa | 1.500 – 8.000 | < 0,001 |

(fonte: elaborado pelo autor; baseado em Amorim, 2008 )

## 5.2 OPERAÇÃO DE SISTEMA DE MEMBRANAS

Conforme Schneider e Tsutiya (2001), as membranas são instaladas em módulos. Um módulo congrega todos os elementos necessários para operar a membrana como uma unidade de separação. O projeto de um módulo tem como objetivo:

a) limitar o acúmulo de material retido pela membrana por meio da circulação de água a ser tratada;

b) maximizar a superfície da membrana por volume de módulo;

c) evitar a contaminação do permeado com o material do concentrado;

d) simplicidade no manuseio;

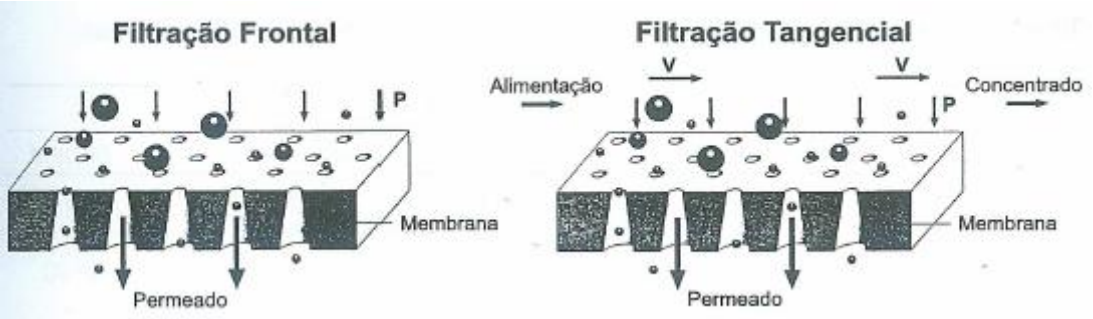
e) limpeza eficiente da membrana; e

f) baixo volume morto.

Além do módulo, a implantação de sistemas por membranas inclui uma bomba com medidor de vazão e pressão instaladas na tubulação de recalque da água bruta; uma válvula, na tubulação do concentrado, com a finalidade de regular a pressão no canal de alimentação e uma tubulação para coleta do permeado. Também é constituído por elementos necessários para a limpeza das membranas, os quais dependem da característica do módulo e tecnologia empregada (DI BERNARDO et al., 2010).

Segundo Amorim (2007), o afluente pode ser bombeado através do módulo em direção paralela à membrana, operação em fluxo tangencial (*cross-flow*), ou perpendicular, operação em fluxo frontal (*dead-end*). A figura 4 apresenta o esquema de operação das membranas.

Figura 4 – Esquema de filtração frontal (*dead-end*) e tangencial (*cross-flow*)




(fonte: Schneider e Tsutiya, 2001)

Conforme Leal (2013) e Amorim (2007), na operação frontal, a solução é pressionada contra a membrana. Neste caso, o solvente atravessa a membrana e o soluto fica retido na superfície reduzindo o fluxo do permeado, este fenômeno é chamado de polarização da concentração. O material retido na superfície da membrana, denominado de torta, aumenta a resistência do meio filtrante.

Ainda segundo os autores, na operação tangencial, o líquido escoa na direção paralela à superfície da membrana, consequentemente o material retido na superfície é constantemente removido. Esta característica faz com que o emprego deste tipo de filtração seja mais generalizado.

## 5.3 PARÂMETROS BÁSICOS DE PROJETOS

Alguns parâmetros são necessários para o projeto e para a análise da eficiência operacional dos processos de separação por membranas, os quais incluem (OLIVEIRA, 2010):

a) fluxo de água através das membranas;
b) recuperação;
c) pressão transmembrana;
d) vazão de alimentação, de permeado e de concentrado;
e) rejeição de solutos; e
f) balanço de massa

As membranas podem ser caracterizadas em função do fluxo de permeado que é uma medida da vazão de permeado e pode ser expressa pela equação 1.

$$J = Q_p / A_m \qquad \text{(equação 1)}$$

Onde:
J = fluxo de água através da membrana, em $L/h.m^2$;
$Q_p$ = vazão do permeado, em L/h;
$A_m$ = área da membrana, em $m^2$.

Na tabela 3 apresentam-se os intervalos usualmente recomendados para os fluxos de água em função do tipo de unidade de filtração por membrana.

Tabela 3 – Valores típicos de fluxo de água em membranas

| PROCESSO | TAXA DE FLUXO ($L/h.m^2$) |
|---|---|
| Microfiltração | 50 a 70 |
| Ultrafiltração | 25 a 50 |
| Nanofiltração | 20 a 30 |
| Osmose Reversa | 15 a 25 |

(fonte: baseado em Libânio, 2010)

Um parâmetro alternativo muito empregado para a comparação de diferentes processos, ou de um processo operado com diferentes pressões de filtração, é a permeabilidade hidráulica (equação 2).

$$L_v = J / P_f \qquad \text{(equação 2)}$$

Onde:
$L_v$= permeabilidade hidráulica, em $L/h.m^2.bar$;
J = fluxo de água através da membrana, em $L/h.m^2$;
$P_f$ = pressão de operação da membrana, em bar.

A permeabilidade depende não só das características físicas e químicas da membrana, mas também da solução e da temperatura de operação.

A eficácia dos processos de separação por membranas é geralmente medida pelo parâmetro denominado rejeição. É definido pela relação das concentrações dos compostos de entrada e de saída do sistema de filtração.

$$r = 1 – C_p / C_a \qquad \text{(equação 3)}$$

Onde:
r = rejeição, em percentagem;
$C_p$ = concentração do composto no permeado, em mg/L;

$C_a$ = concentração do composto na alimentação, em mg/L.

Segundo Schneider e Tsutiya (2001), os principais mecanismos de rejeição em processos por membranas são:

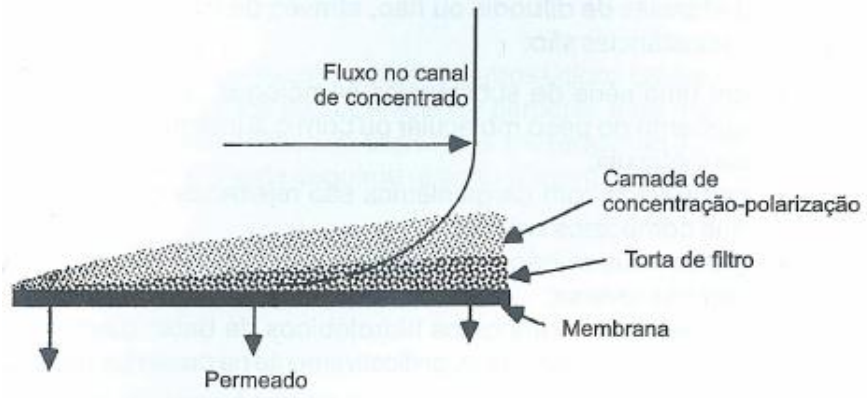
a) retenção física de partículas, íons ou moléculas com diâmetro superior a porosidade da membrana;
b) bloqueio físico dos poros da membrana;
c) adsorção de material no interior dos poros; e
d) taxas reduzidas ou até impedimento de difusão de substâncias através do polímero da membrana.

## 5.4 CONCENTRAÇÃO-POLARIZAÇÃO E *FOULING*

Segundo Schneider e Tsutiya (2001), o fluxo é o parâmetro mais importante para caracterizar uma membrana. Os principais fatores que reduzem o fluxo através da membrana são o fenômeno da concentração-polarização e o *fouling*.

O fenômeno da concentração-polarização é caracterizado pelo acúmulo de material rejeitado pela membrana, que se forma na camada limite do meio, junto a sua superfície ou da torta de filtro (AMORIM, 2007). A figura 5 ilustra o fenômeno.

Figura 5 – Esquema da formação do fenômeno da concentração-polarização




(fonte: Schneider e Tsutiya, 2001)

A concentração-polarização é um fator importante de redução da eficiência de filtração de membranas de osmose reversa e nanofiltração. Com a finalidade de minimizar o efeito do fenômeno, pode-se aumentar a velocidade de escoamento da água no canal do concentrado e,

também, aumentar a turbulência na superfície da membrana (SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001).

Enquanto o efeito de polarização ocasiona uma queda brusca do fluxo no início da filtração, o *fouling* gera uma diminuição mais lenta, o qual ocorre com o decorrer do tempo de filtração. O *fouling* é caracterizado pela formação de depósitos de matéria orgânica e o crescimento de comunidades microbianas (LEAL, 2013; SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001).

O *fouling* pode ocorrer de diversas maneiras: bloqueio de poros por partículas ou moléculas com diâmetro semelhante ao dos poros, adsorção de material na superfície da membrana, adesão de microrganismos na membrana (*biofouling*), e acúmulo de sais rejeitados pela membrana. Para controlar esse efeito, Schneider e Tsutiya (2001) recomendam utilizar as seguintes estratégias:

a) pré-tratamento da água de alimentação;
b) seleção de membrana apropriada ao sistema;
c) seleção apropriada do módulo e otimização dos processos de operação (pressões mais baixas e velocidades elevadas); e
d) limpeza da membrana.

## 5.5 LIMPEZA DAS MEMBRANAS

Segundo Schleicher (2013), existem dois processos de limpeza das membranas: retrolavagem e limpeza química.

A retrolavagem tem a função de restaurar o fluxo da membrana próxima ao escoamento inicial. O processo consiste em bombear água ou ar comprimido através da membrana em direção contrária à filtração, por um intervalo de tempo curto. A retrolavagem é usualmente empregada em sistemas de microfiltração e ultrafiltração (SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001).

Entretanto o material não removido pelo processo de retrolavagem pode ser efetuado a partir da limpeza química, o que permite restaurar o escoamento pela membrana. A eficiência da limpeza depende da formulação da solução, da frequência de aplicação e do processo de aplicação. Schneider e Tsutiya (2001) indicam alternar a composição da solução utilizada na limpeza da membrana, para evitar a seleção de organismos resistentes à solução.

# 6 MEMBRANAS DE NANOFILTRAÇÃO

A nanofiltração, segundo Habert et al. (2006), pode ser considerada um processo com membranas capaz de separar moléculas de massa molar entre 500 e 2.000 Dalton. Ainda é vista como membranas fechadas de ultrafiltração ou membranas abertas de osmose reversa. Operam, em comparação às membranas de osmose reversa, com pressões mais baixas. Portanto, conforme Cheis (2013), a nanofiltração apresenta características intermediárias entre a ultrafiltração e a osmose reversa, sendo considerada economicamente favorável quando comparada à osmose reversa.

A tecnologia de nanofiltração é semelhante à osmose reversa, ou seja, a pressão de operação deve superar a resistência da membrana, da zona de concentração-polarização e a resistência interna do equipamento (SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001).

Como visto anteriormente, a dimensão dos poros é inferior a 1 nm e a pressão de operação nos sistemas varia entre 5 e 20 bar (FERREIRA, 2010). Schneider e Tsutiya (2001) e Ferreira (2010) indicam que as membranas de nanofiltração podem ser empregadas na área de saneamento básico para:

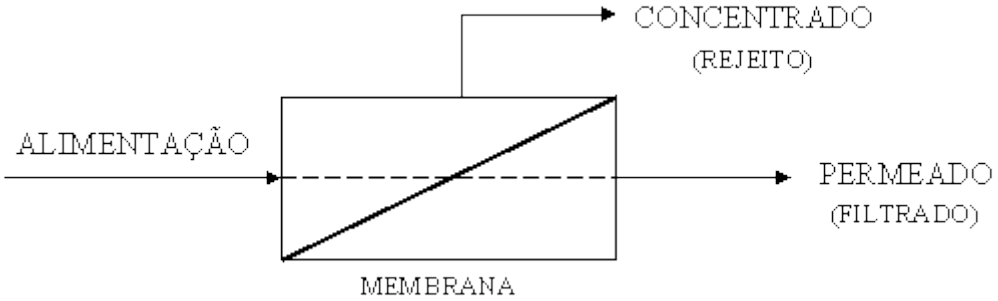
a) remover substâncias derivadas de subprodutos de desinfecção;
b) remoção da dureza;
c) remoção de matéria orgânica dissolvida;
d) remoção de pesticidas;
e) remoção de metais pesados; e
f) tratamento de água salobra.

Assim, Schäfer[2] (2005 apud FERREIRA, 2010) cita os principais fatores que distinguem a nanofiltração dos outros processos de separação por membranas, os quais são: a eficiência de remoção de íons negativos multivalentes; e a remoção de partículas sem carga, material dissolvido e a maioria dos íons positivos que se encontram relacionados com o tamanho e a forma da espécie.

[2] SCHÄFER, A. I.; FANE, A. G.; WAITE, T. D. **Nanofiltration: Principles and Applications**. Oxford, UK: Elsevier Science Publishers. 2005.

Segundo Schleicher (2013), a nanofiltração também se caracteriza por envolver três fluxos: alimentação, permeado e concentrado. A vazão de alimentação (água bruta) a qual se divide em outras duas: o efluente, denominado de permeado (água tratada), que se refere a vazão que atravessou a membrana (filtrada); e o concentrado ou rejeito que constitui a vazão de descarte contendo material retido na membrana a qual não atravessou. A figura 6 ilustra o processo de separação.

Figura 6 – Desenho esquemático do funcionamento de filtração




(fonte: baseado em Libânio, 2010)

A nanofiltração possui diversas vantagens quando comparada ao tratamento convencional de água, os quais, segundo Schneider e Tsutiya (2001), são:

a) não produz lodo;
b) demanda de cloro reduzida;
c) não necessitam de produtos químicos no tratamento;
d) plantas modulares, maior facilidade para expansão da capacidade instalada;
e) plantas mais compactas e maior automatização;
f) simplicidade de operação;
g) manutenção mínima;
h) remoção de contaminantes biológicos, orgânicos e inorgânicos; e
i) produção de água tratada de alta qualidade.

No entanto, Amorim (2007) pondera que há fatores que influenciam o fluxo do permeado diminuindo a eficiência da membrana, sendo eles as características da água bruta (pH, temperatura, dureza, presença de matéria orgânica) e fatores operacionais (pressão, velocidade tangencial e concentração de contaminantes na água de alimentação). Assim, Schneider e

Tsutiya (2001) apresentam resumidamente as desvantagens da utilização da nanofiltração em tratamento de água:

a) a água bruta deve conter baixa quantidade de sólidos e de compostos que podem afetar a eficiência da membrana;
b) tratamento de águas superficiais dependem de pré-tratamento; e
c) produção de concentrado.

O pré-tratamento, segundo Ferreira (2010), pode melhorar o desempenho e proteger as membranas de nanofiltração e de osmose reversa, visto que são utilizadas para tratamento de contaminantes solúveis. Ainda sugere a utilização de pré-tratamento como a coagulação/floculação/sedimentação ou sistemas convencionais de filtração para reduzir a quantidade de sólidos da água bruta.

Em membranas de nanofiltração e de osmose reversa, o principal mecanismo de rejeição é a retenção química. Também pode ocorrer a rejeição física com íons e moléculas nas membranas de nanofiltração (SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001).

A eficiência do tratamento de água por sistemas de nanofiltração é abordado pelo Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB). São comparados diversos processos para a remoção de gosto e odor das águas destinadas ao abastecimento. O estudo através do sistema de nanofiltração apresentou alta eficiência para a remoção dos contaminantes (PÁDUA, 2010).

O sistema de membranas de nanofiltração para a remoção de ferro e manganês na água apresenta alta eficiência. Os resultados de estudos mostram reduções dos compostos até 100%, quando comparado à água afluente do efluente (CASTAÑEDA, 2010).

# 7 METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste trabalho, a comparação dos custos do sistema de tratamento de água por nanofiltração foi analisado com base no projeto desenvolvido pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) para a ampliação do Sistema de Abastecimento de Água (SAA) do município de Capivari do Sul, o qual consiste no tratamento de água através do processo de aeração seguida de filtração.

Para o desenvolvimento do trabalho, foram levantados os parâmetros e as características da água a ser tratada. Também foram buscados os dados suficientes para caracterizar a membrana a ser utilizada no projeto.

Sequencialmente foi caracterizado o sistema atual de produção de água do município em estudo. Assim, puderam ser observadas as necessidades de buscar tecnologias alternativas que possam ser mais eficientes e econômicas para o tratamento de águas subterrâneas com a presença de ferro e manganês. Após a análise do sistema existente, foi caracterizado o projeto proposto para a ampliação do SAA desenvolvido pela CORSAN.

Após a caracterização do sistema estudado, foi realizada a avaliação dos custos de implantação do sistema de nanofiltração. Nessa etapa, contataram-se empresas que atuam na área de tratamento de água com a utilização de membranas de filtração.

De posse de todas informações do projeto, foi possível avaliar os custos e comparar os resultados entre os processos de tratamento de água, buscando identificar a melhor alternativa economica.

# 8 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE CAPIVARI DO SUL

A região de Capivari do Sul localiza-se na Planície Costeira do estado do Rio Grande do Sul. Devido à variabilidade de tipos sedimentares, a qualidade da água varia muito. Nas áreas arenosas, a água encontrada no aquífero tende a ser de qualidade, sendo que nas zonas argilosas a quantidade de íons dissolvidos pode ser alta (CORSAN, 2011).

As tabelas 4 e 5 resumem o resultado dos parâmetros físico-químicos para os poços CPV-01 e CPV-02 respectivamente. Esses parâmetros permitem avaliar a qualidade da água bruta captada. As tabelas, também, apresentam as concentrações máximas permitidas pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde.

Tabela 4 – Ensaio Físico-Químico do Poço CPV-01 realizado em 2014 à 2016

| PARÂMETROS | MÁXIMO | MÍNIMO | MÉDIA | PORTARIA 2.914/2011 (MÁX.) |
|---|---|---|---|---|
| | | ANO 2014 | | |
| Ferro Total (mg/L Fe) | 0,80 | 0,50 | 0,70 | 0,3 |
| Manganês Total (mg/L Mn) | 0,05 | 0 | 0 | 0,1 |
| Turbidez (NTU) | 1,80 | 0 | 0,88 | 5 |
| | | ANO 2015 | | |
| Ferro Total (mg/L Fe) | 0,90 | 0,10 | 0,69 | 0,3 |
| Manganês Total (mg/L Mn) | 0,16 | 0 | 0,03 | 0,1 |
| Turbidez (NTU) | 1,30 | 0 | 0,59 | 5 |
| | | ANO 2016 | | |
| Ferro Total (mg/L Fe) | 1,30 | 0 | 0,58 | 0,3 |
| Manganês Total (mg/L Mn) | 0,44 | 0 | 0,10 | 0,1 |
| Turbidez (NTU) | 2,80 | 0 | 0,38 | 5 |

(fonte: elaborado pelo autor; baseado em CORSAN)

Pela análise da tabela 4, pode-se observar que as concentrações de ferro e de manganês, para o poço CPV-01, estão acima das concentrações recomendadas pela legislação. Os demais parâmetros estão dentro dos limites estabelecidos e aceitáveis.

Tabela 5 – Ensaio Físico-Químico do Poço CPV-02 realizado em novembro de 2009

| PARÂMETROS | VALOR | UNIDADE | PORTARIA 2.914/2011 (MÁX.) |
|---|---|---|---|
| Alcalinidade Total | 142 | mg/L CaCO3 | - |
| Alumínio Total | 0,359 | mg/L Al | 0,2 |
| Cloretos | 34,4 | mg/L Cl- | 250 |
| Cor | 20 | mg/L Pt-Co | 15 |
| Dureza | 74 | mg/L CaCO3 | 500 |
| Ferro Total | 1,1 | mg/L Fe | 0,3 |
| Fluoretos | 0,7 | mg/L F | 1,5 |
| Manganês Total | 0,178 | mg/L Mn | 0,1 |
| pH | 7,7 à 21°C | - | 6 à 9,5 |
| Sólidos Dissolvidos Totais | 198 | mg/L | 1.000 |
| Sólidos Totais | 227 | mg/L | - |
| Sulfatos | 2,28 | mg/L SO4 | 250 |
| Turbidez | 5,2 | NTU | 5 |

(fonte: elaborado pelo autor; baseado em CORSAN)

Considerando a legislação vigente, as concentrações do ferro, do manganês e do alumínio, para o CPV-02, estão acima dos limites aceitáveis. Devido à alta concentração desses metais, os mesmos conferem à agua cor e sabor tornando-a desagradável ao consumo.

Atualmente, existe uma Estação de Tratamento de Água (ETA) provisória junto ao poço CPV-01 composta por aerador e filtro. A tabela 6 resume os resultados dos parâmetros físico-químicos da água tratada do poço CPV-01. Também apresenta os limites estabelecido pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde.

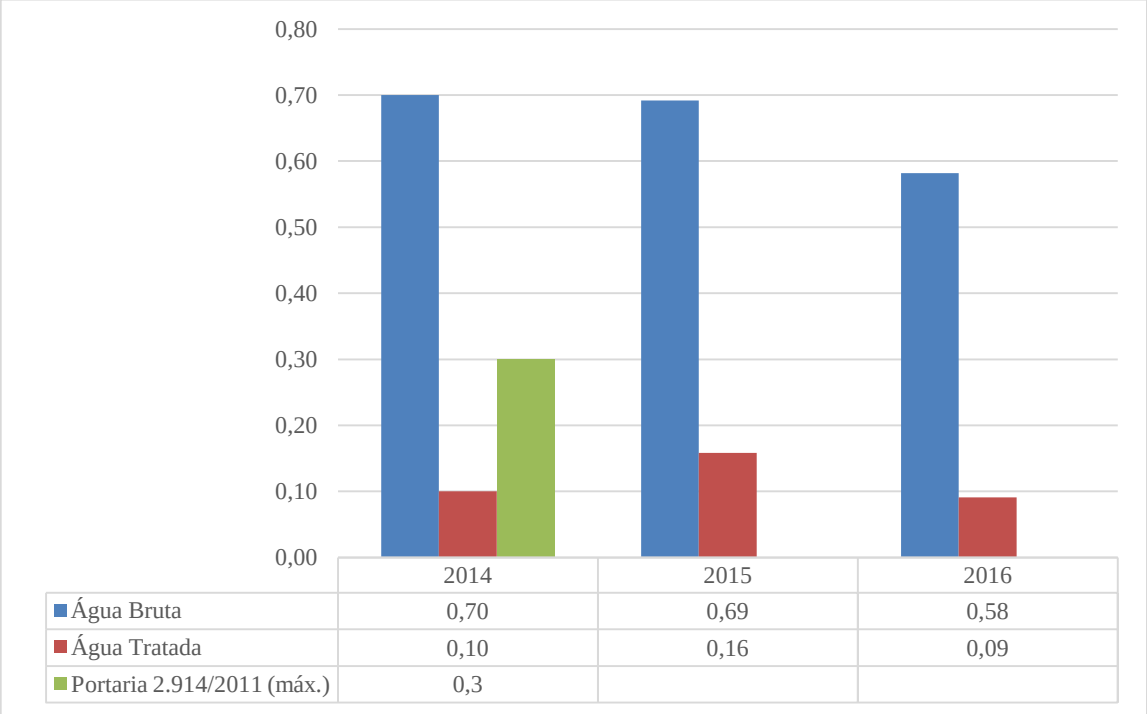
Tabela 6 – Ensaio Físico-Químico da água tratada realizado em 2014 à 2016

| PARÂMETROS | MÁXIMO | MÍNIMO | MÉDIA | PORTARIA 2.914/2011 (MÁX.) |
|---|---|---|---|---|
| ANO 2014 | | | | |
| Cor (mg/L Pt-Co) | 10 | 2 | 7 | 15 |
| Ferro Total (mg/L Fe) | 0,20 | 0 | 0,10 | 0,3 |
| Flúor (mg/L F) | 1,30 | 0,30 | 0,72 | 1,5 |
| Manganês Total (mg/L Mn) | 0,02 | 0 | 0 | 0,1 |
| pH | 8 | 7,2 | 7,61 | - |
| Turbidez (NTU) | 1,40 | 0 | 0,59 | 5 |
| ANO 2015 | | | | |
| Cor (mg/L Pt-Co) | 19 | 2 | 3 | 15 |
| Ferro Total (mg/L Fe) | 0,90 | 0,10 | 0,16 | 0,3 |
| Flúor (mg/L F) | 1 | 0,30 | 0,66 | 1,5 |
| Manganês Total (mg/L Mn) | 0,10 | 0 | 0,02 | 0,1 |
| pH | 8 | 7,1 | 7,56 | - |
| Turbidez (NTU) | 1,20 | 0 | 0,36 | 5 |
| ANO 2016 | | | | |
| Cor (mg/L Pt-Co) | 10 | 0 | 3 | 15 |
| Ferro Total (mg/L Fe) | 0,60 | 0 | 0,09 | 0,3 |
| Flúor (mg/L F) | 1,40 | 0,10 | 0,66 | 1,5 |
| Manganês Total (mg/L Mn) | 0,29 | 0 | 0,03 | 0,1 |
| pH | 8,6 | 7 | 7,78 | - |
| Turbidez (NTU) | 2,60 | 0 | 0,20 | 5 |

(fonte: elaborado pelo autor; baseado em CORSAN)

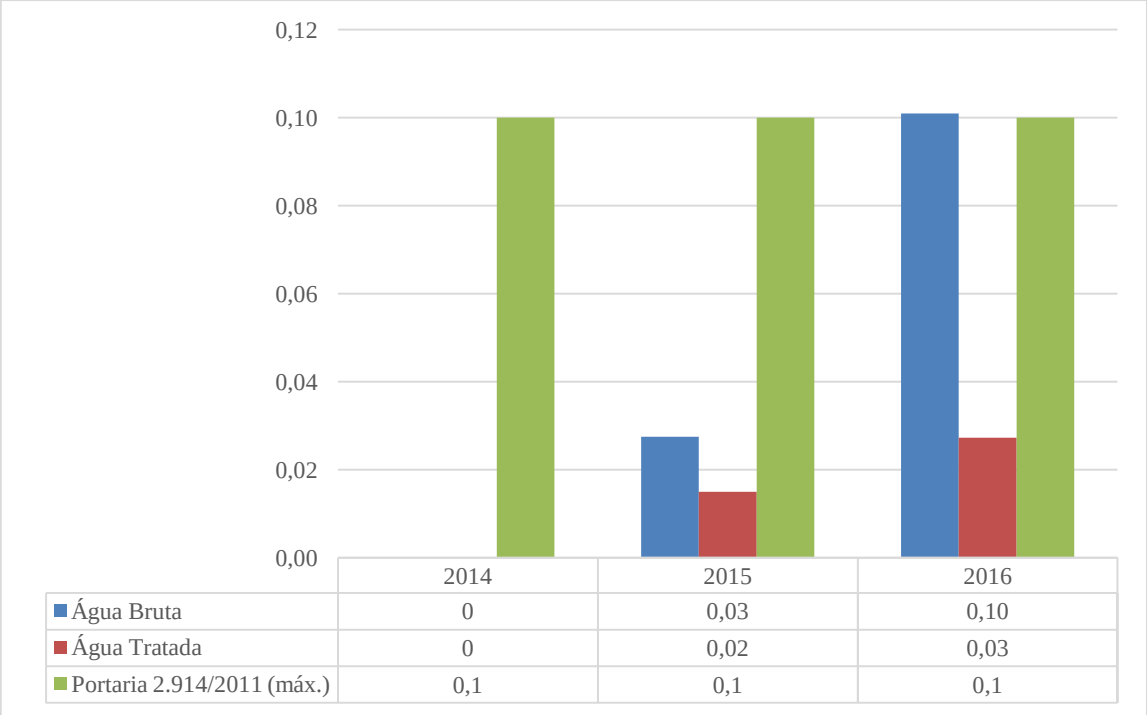
Através da tabela 6, observa-se que as concentrações médias de ferro e de manganês na água após o tratamento estão dentro das concentrações recomendadas pela legislação. Houve redução das concentrações médias em comparação a tabela 4. Nas figuras 7 e 8 são verificados as comparações dos ensaios para o CPV-01, respectivamente, para as concentrações de ferro e manganês.

Figura 7 – Comparativo dos ensaios em relação às concentrações médias do ferro




(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 8 – Comparativo dos ensaios em relação às concentrações médias do manganês

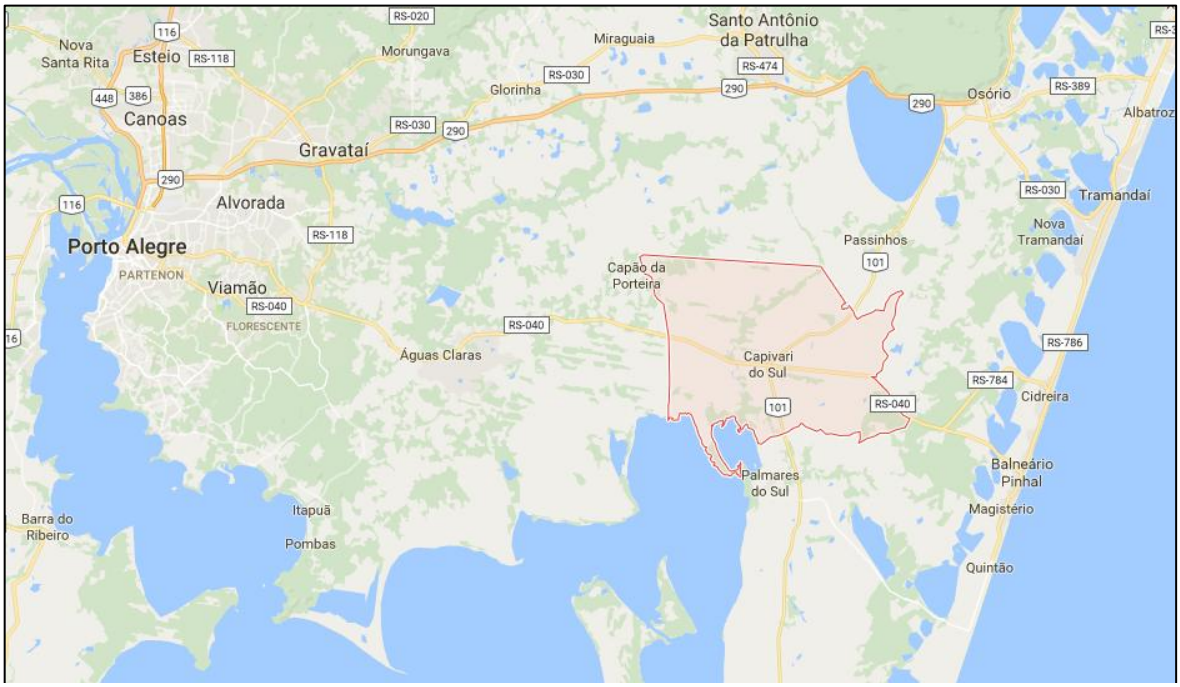



(fonte: elaborado pelo autor)

# 9 SISTEMA DE PRODUÇÃO DE ÁGUA DE CAPIVARI DO SUL

Capivari do Sul situa-se no litoral norte do estado do Rio Grande do Sul, a 78 km da capital, entre os cruzamentos das rodovias ERS 040 e RSC 101. Localiza-se nas coordenadas 30°08'42" de latitude sul e 50°30'53" de longitude oeste (CAPIVARI DO SUL, 2016). A figura 9 apresenta a localização do município referente ao estado.

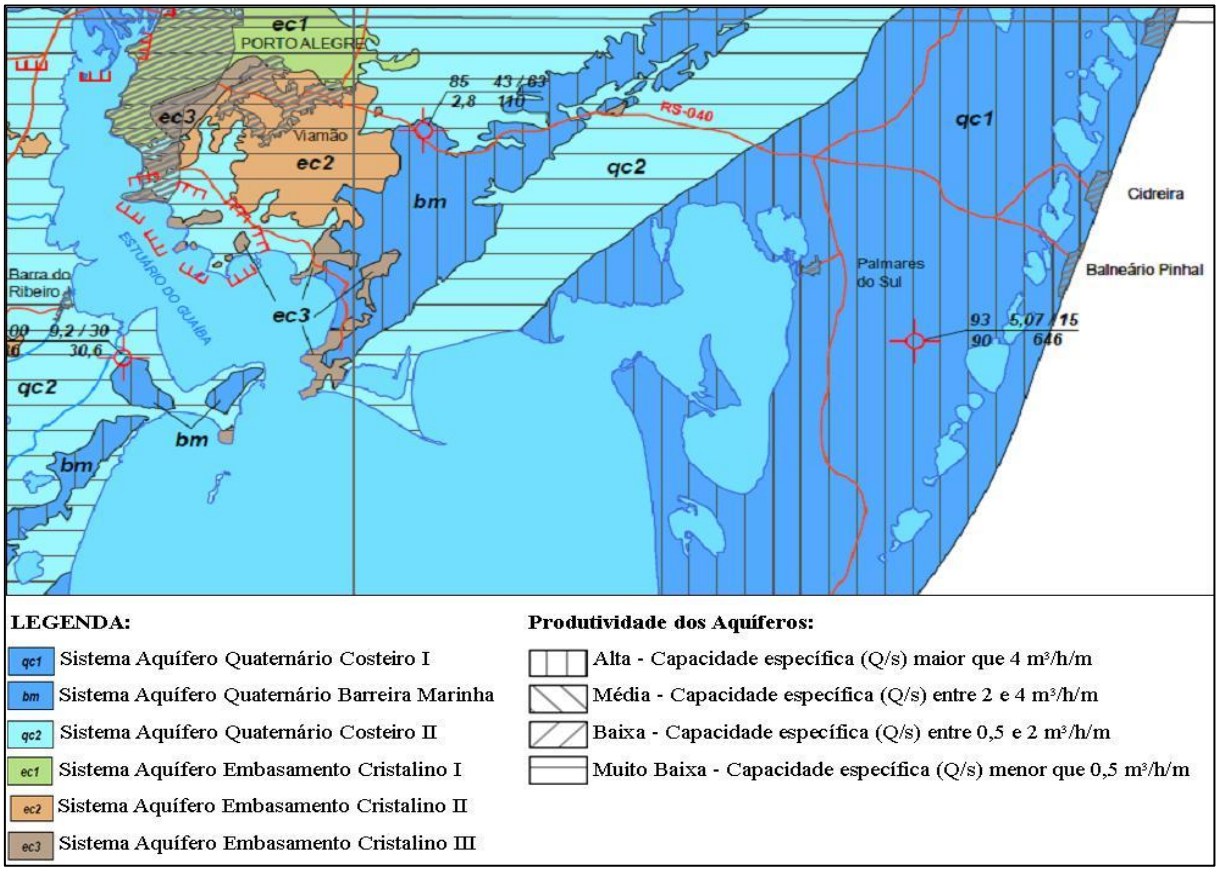
Figura 9 – Localização de Capivari do Sul




(fonte: Google, 2016)

A região de Capivari do Sul compreende a Planície Costeira externa onde ocorre o Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I. Nesse aquífero, a qualidade da água varia muito devido a superposição dos aquíferos e a grande variedade de sedimentos (CORSAN, 2011). A figura 10 ilustra o mapa hidrogeológico da região de Capivari do Sul.

Figura 10 – Mapa hidrogeológico




(fonte: CORSAN, 2011)

A seguir é apresentado o sistema produtor de água potável para a ampliação do tratamento do município de Capivari do Sul, o qual foi dimensionado uma estação de tratamento por aeração seguida de filtração.

## 9.1 EXISTENTE

O sistema produtor do município de Capivari do Sul é composto por duas unidades de poços tubulares, mas atualmente apenas um encontra-se ativo, o poço denominado de CPV-01. O poço CPV-02 foi desativado em razão do reservatório apresentar-se bastante danificado pela ferrugem, sendo que serve somente como reserva técnica. A vazão média captada pelo poço ativo é em torno de 40 m³/h (entre 11 e 12 L/s) e com máxima de 60 m³/h (aproximadamente 17 L/s) (CAPIVARI DO SUL, 2012).

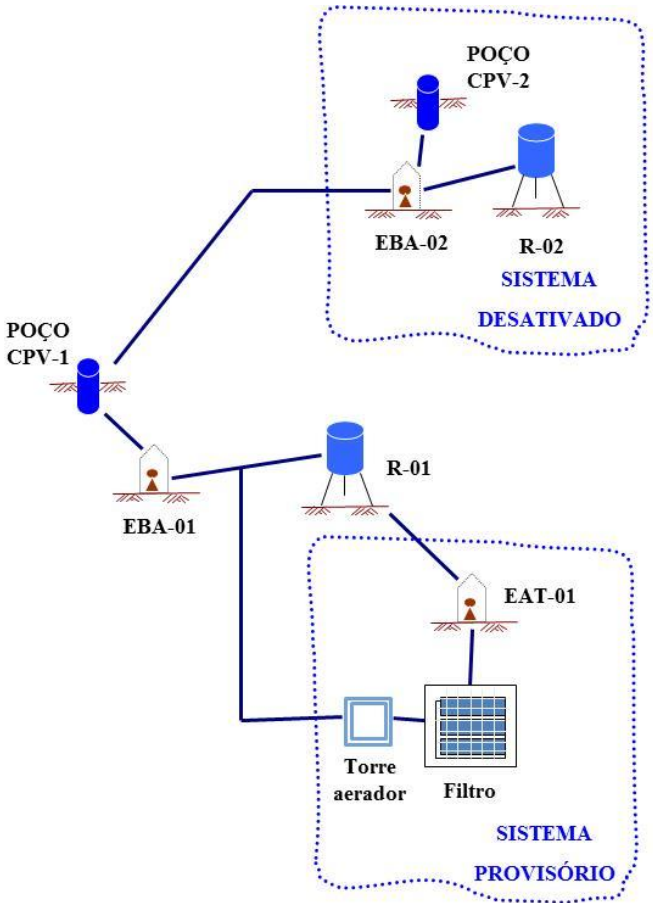
O tratamento de água é simplificado e realizado junto ao poço CPV-01 através da pré-cloração adicionada direto no poço e da pós-cloração adicionada no reservatório. Os produtos

químicos (hipoclorito de sódio, fluossilicato de sódio e ortopolifosfato) são adicionados através de bombas dosadoras acionadas automaticamente quando o poço entra em operação (CAPIVARI DO SUL, 2012).

Junto ao poço CPV-01, está instalada uma Estação de Tratamento de Água (ETA) provisória. Ela é composta por aerador de bandeja e filtro para remover o ferro e o manganês apresentado na água subterrânea captada, minimizando o problema (CAPIVARI DO SUL, 2012).

Esse sistema provisório foi proposto com o objetivo de melhorar a qualidade da água distribuída para a população devido as constantes reclamações dos usuários. Entretanto, a água captada no poço CPV-01 é desviada para a torre de aeração, a qual antes era encaminhada direto para a rede de distribuição. A rede é alimentada através da bomba de recalque próxima ao filtro, que enche o reservatório de compensação junto ao poço CPV-01 e distribui para a rede (CAPIVARI DO SUL, 2012). A figura 11 apresenta o fluxograma do sistema existente e provisório do município de Capivari do Sul.

Figura 11 – Sistema produtor existente e provisório




(fonte: elaborado pelo autor; baseado em CORSAN, 2012)

## 9.2 PROJETO

O Projeto Executivo do SAA de Capivari do Sul foi elaborado com o objetivo de melhorar a qualidade da água distribuída pela CORSAN, visto que a água captada apresenta teor de ferro e manganês acima das concentrações recomendadas pela legislação. O projeto também tem a finalidade de suprir a demanda de consumo da população para a projeção de final de plano, ano 2040.

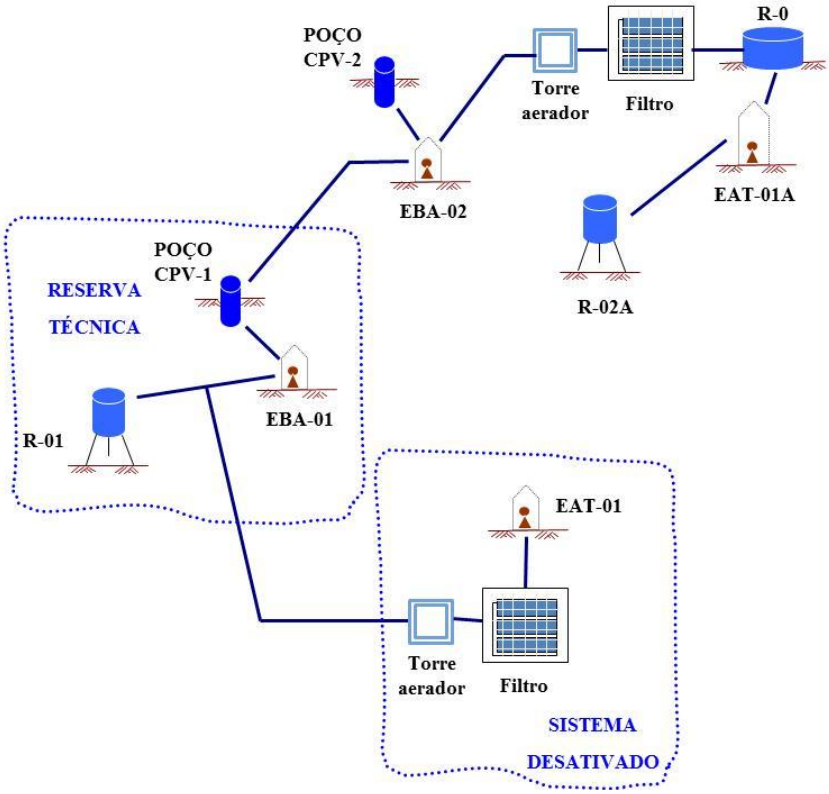
O projeto consiste na substituição do sistema provisório pela reativação do poço CPV-02, a qual se tornará a captação de água do sistema, com vazão de 20 L/s. Tendo em vista que o poço CPV-01, ficará desativado servindo somente como reserva técnica. O poço CPV-02 contará com uma elevatória a qual conduzirá a água captada até a ETA a ser implantada (CORSAN, 2012).

A Estação de Tratamento de Água (ETA) foi projetada para reduzir as concentrações de ferro e manganês para valores admitidos pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde. Ela contará com uma torre de aeração seguida de filtração, que junto com a pré-cloração, será responsável pela oxidação dos metais (CORSAN, 2012).

O aerador projetado será de bandeja, sendo que a primeira servirá apenas para distribuir uniformemente a água. As outras três bandejas serão constituídas de prateleiras vazadas com uma camada de pedras. A taxa de aplicação do aerador foi projetada para 1.087 $m^3/m^2$.dia, sendo que Richter e Azevedo Neto (1991) sugerem que esteja compreendido entre 540 a 1.630 $m^3/m^2$.dia. O fundo do aerador servirá de decantação da água após o processo de oxidação (CORSAN, 2012).

O sistema de filtração será constituído de dois filtros (para cada módulo de 10 L/s) com meio filtrante duplo constituído de areia e antracito. Eles deverão operar com uma taxa de filtração de 130 $m^3/m^2$.dia. Após a filtração, a água será conduzida para uma câmara de mistura, onde será adicionado hipoclorito de sódio (pós-cloração) e ortopolifosfato (CORSAN, 2012). A figura 12 apresenta o fluxograma do novo sistema proposto para o município de Capivari do Sul.

Figura 12 – Sistema produtor projetado




(fonte: elaborado pelo autor; baseado em CORSAN, 2012)

# 10 PROJETO DO SISTEMA DE NANOFILTRAÇÃO

O projeto do sistema de nanofiltração foi dimensionado para a mesma vazão da ETA projetada pela CORSAN, ou seja, 20 L/s. Esta vazão é suficiente para atender a demanda do município de Capivari do Sul no final do período de alcance, ano 2040.

A água bruta será captada no poço CPV-02, com vazão nominal de 20 L/s (72.000 L/h), e chegará ao sistema de separação por membranas através de uma adutora em PVC DN 150, conforme previsto no projeto da CORSAN (2011).

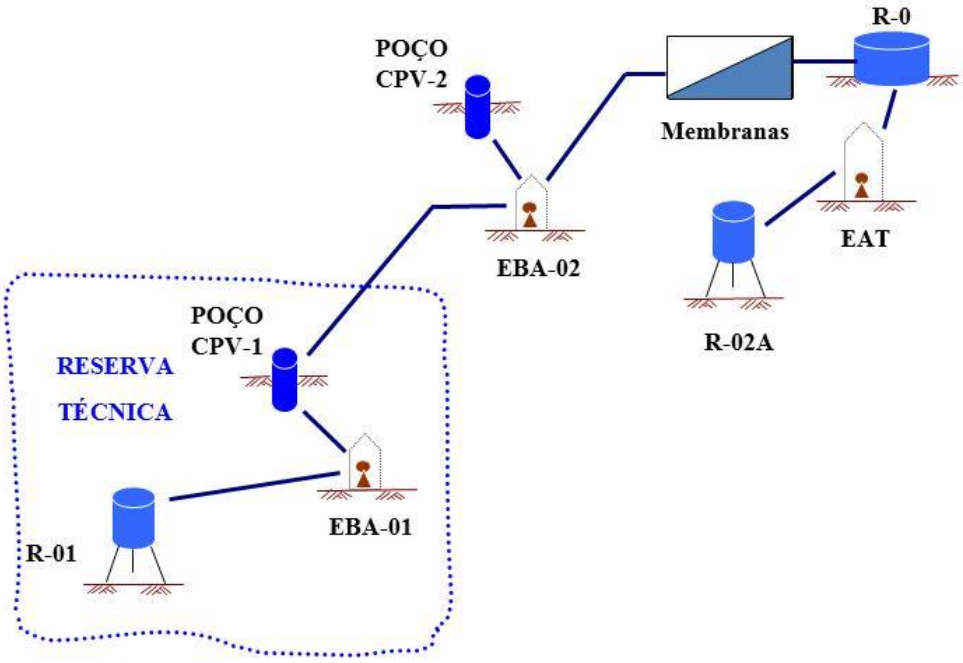
Pela análise da qualidade da água apresentada no item 8, observa-se que as concentrações de ferro e de manganês estão acima dos limites aceitáveis pela legislação, sendo que os demais parâmetros encontram-se dentro das recomendações feita pela Portaria. Esses metais tornam a água desagradável ao consumo, devido ao fato de conferir cor e sabor à água, bem como inviabiliza o uso para diversas atividades industriais.

O processo de tratamento deverá ser capaz de reduzir as concentrações de ferro e de manganês para valores aceitáveis. Portanto, o sistema de separação por membrana por nanofiltração é recomendado para a situação, tendo em vista sua alta eficiência na remoção desses metais. Como os sólidos totais não são representativos na água captada, não foi feita previsão de pré-tratamento para o sistema de nanofiltração. A figura 13 apresenta a configuração do sistema de nanofiltração projetado.

O sistema deverá possuir área, conforme apresentado na equação 4, de 2.400 m², ou seja, serão necessários 11 vasos de pressão contendo 6 membranas de nanofiltração por vaso, conforme informação do fabricante. O fluxo de água através de membrana é para 30 L/h.m² (tabela 3) e com pressão de operação de 483 a 2.069 kPa, conforme informação do fabricante.

$$A_m = Q_p / J = 72.000 \text{ L/h} / 30 \text{ L/h.m}^2 = 2.400 \text{ m}^2 \qquad \text{(equação 4)}$$

Figura 13 – Configuração do sistema de nanofiltração




(fonte: elaborado pelo autor)

Para fins de comparação, foi utilizada a membrana de nanofiltração do tipo espiral da marca GE *Power & Water*, modelo MUNI-NF-400. As principais características estão apresentadas na tabela 7, conforme dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 7 – Principais características da membrana selecionada

| PARÂMETROS | DADOS |
|---|---|
| Material | fibra de vidro |
| Configuração | espiral |
| Modelo | MUNI-NF-400 |
| Área (m²) | 37,2 |
| Diâmetro (cm) | 20,1 |
| Comprimento (cm) | 101,6 |
| Vazão de alimentação (m³/h) | 6,8 |
| pH na operação | 3 - 9 |
| pH na limpeza | 2 - 10,5 |
| Temperatura máxima de operação (°C) | 45 |

continua

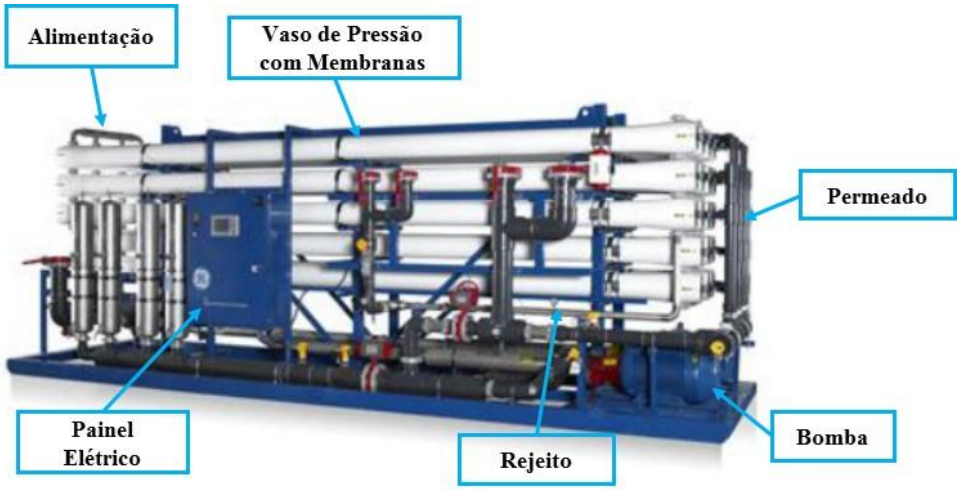
continuação

| PARÂMETROS | DADOS |
|---|---|
| Temperatura máxima de limpeza (°C) | 40 |
| Pressão de operação (kPa) | 483 - 2.069 |
| Pressão máxima admissível pelo fabricante (kPa) | 4.137 |
| Tolerância de cloro (ppm) | 1.000 |
| Turbidez (NTU) | < 1,0 |
| Rejeição média (% $MgSO_4$) | 98 |

(fonte: elaborado pelo autor; baseado em GE *Power & Water*)

O sistema de separação por membrana, como visto no item 5.2, deverá ser constituído por bomba centrífuga, vaso de pressão contendo as membranas de nanofiltração, manômetro, medidor de vazão e painel elétrico, além de tubulações, válvulas, conexões e acessórios para a operacionalidade do sistema. A figura 14 apresenta o módulo selecionado.

Figura 14 – Módulo do sistema de nanofiltração




(fonte: GE *Power & Water*, 2016)

É previsto um sistema de lavagem submetendo a membrana a uma solução de limpeza de modo a recircular por todo o sistema. A limpeza química deverá ser feita periodicamente uma vez por mês com duração de 4 horas, com o objetivo de prevenir ou retardar a formação de incrustações. Também serve para restabelecer o fluxo do permeado.

# 11 AVALIAÇÕES DOS CUSTOS

O sistema convencional projetado pela CORSAN é constituído pela torre de aeração do tipo bandeja, pelo filtro, pela casa de química e pelo reservatório de lavagem dos filtros. Os custos de investimentos para o sistema foram obtidos através do orçamento desenvolvido pela CORSAN para o Projeto Executivo do SAA de Capivari do Sul. O custo de investimento refere-se aos gastos necessários para implantar o sistema.

Para efeito de comparação, os custos obtidos no projeto da CORSAN elaborado no ano de 2012 foram atualizados através do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) e, também, mediante consulta a fornecedores especializados, conforme procedimento adotado nos orçamentos da CORSAN.

Para a obtenção do custo de operação foram considerados: pessoal, produtos químicos, energia elétrica e reposição de alguns materiais e equipamentos. Os custos com a mão-de-obra foram obtidos através das tabelas de salários da CORSAN e incluído os encargos sociais. Esses gastos compreendem os custos relacionados à operação e à conservação das instalações e equipamentos.

Os custos foram obtidos através do setor operacional da CORSAN e, os itens de reposição de materiais e equipamentos foram considerados os mais relevantes do sistema. Os principais gastos com a reposição foram: dosadores de produtos químicos, equipamentos de laboratório e meio filtrante. Na tabela 8 é apresentada a vida útil dos itens considerados para a reposição no sistema convencional.

Tabela 8 – Vida útil de alguns itens

| BENS | VIDA ÚTIL (anos) |
|---|---|
| Dosadores de produtos químicos | 7 |
| Equipamentos de laboratório | 10 |
| Meio filtrante | 10 |

(fonte: elaborado pelo autor; baseado em Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008)

Em relação ao sistema de nanofiltração, o módulo é constituído por membranas do tipo espiral. Os custos associados para o investimento do sistema foram obtidos mediante consulta a empresa GE *Power & Water* e considerado o orçamento de uma casa de química baseado somente na parte civil de implantação.

A obtenção dos custos operacionais do sistema de nanofiltração também foi obtido através da empresa GE *Power & Water*. São previstos gastos com mão-de-obra, produtos químicos, energia elétrica e a reposição das membranas a cada 3 anos e com cartuchos de filtros a cada mês.

A comparação econômica dos sistemas foi feita considerando os valores de investimento e as despesas de manutenção e operação ao longo do plano. O método utilizado para a avaliação dos custos foi empregado o método do Valor Presente Líquido (VPL) e a análise do Custo Marginal.

A equação 5 representa o VPL que consiste em transferir para o instante atual todos os custos esperados a uma determinada taxa de juros, a qual é considerada 12%, conforme adotado nos estudos da CORSAN.

$$VPL = X / (1 + i)^n \qquad \text{(equação 5)}$$

Onde:
VPL = valor presente líquido, R$;
X = valor de investimento e/ou valor dos gastos com operação e manutenção, R$;
i = taxa de retorno de capital, adotado 12 % a.a.;
n = horizonte de planejamento.

O Custo Marginal é expresso na equação 6, a qual considera o valor do metro cúbico da água produzida.

$$CM = (VPL_{inv} + VPL_{op}) / VP_{VP} \qquad \text{(equação 6)}$$

Onde:

CM = custo marginal, R$/m³;

$VPL_{inv}$ = valor presente líquido de investimento, R$;

$VPL_{op}$ = valor presente líquido dos custos de operação, R$;

$VP_{VP}$ = valor presente de volume produzido de água, m³.

A partir dos dados sobre custos de investimento e de operação para os sistemas de tratamento considerados, foram obtidos os custos para tratamento, por meio de uma planilha em Excel. Sempre que necessário, a conversão de valores foi feita considerando-se a taxa de câmbio de R$ 3,15/US$.

# 12 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na tabela 9 são apresentadas as principais unidades e componentes do sistema convencional com os respectivos custos de implantação para a remoção de ferro e de manganês com capacidade de 20 L/s de água tratada. Estes custos foram obtidos a partir do orçamento elaborado pela CORSAN e atualizados pelo SINAPI e através de consulta a fornecedores.

Tabela 9 – Custos de investimento para o sistema convencional

| COMPONENTES | CUSTOS (R$) | |
|---|---|---|
| | ORÇAMENTO NOV/2012 | ORÇAMENTO OUT/2016 |
| Bloco Hidráulico | R$ 675.073,34 | R$ 853.443,13 |
| Casa de Química | R$ 159.159,31 | R$ 235.343,83 |
| Reservatório de Lavagem dos Filtros (50 m³) | R$ 123.848,27 | R$ 218.510,85 |
| TOTAL | R$ 958.080,92 | R$ 1.307.297,80 |

(fonte: elaborado pelo autor)

Na tabela 10 estão apresentados os custos de investimento para o sistema de nanofiltração, o qual foi considerado como módulo de membranas com capacidade para tratar uma vazão de 20 L/s e uma casa de química. Os custos foram obtidos através do contato com a empresa GE *Power & Water*.

Tabela 10 – Custos de investimento para o sistema de nanofiltração

| COMPONENTES | CUSTOS (R$) OUT/2016 |
|---|---|
| Módulo de Nanofiltração | R$ 1.568.000,00 |
| Casa de Química | R$ 149.452,03 |
| TOTAL | R$ 1.711.452,03 |

(fonte: elaborado pelo autor)

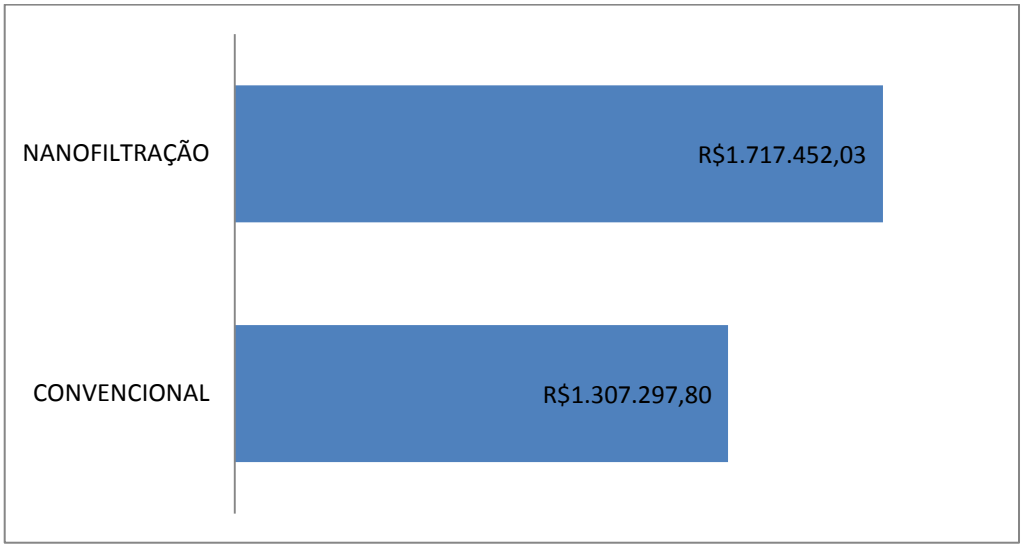
Na tabela 11 pode-se verificar a comparação dos custos de investimento para os sistemas de tratamento. Os valores foram organizados em forma de gráfico, figura 15, para melhor visualização dos resultados.

Tabela 11 – Comparação dos custos de investimento

| SISTEMA | CUSTO (R$) |
|---|---|
| Convencional | R$ 1.307.297,80 |
| Nanofiltração | R$ 1.711.452,03 |

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 15 – Comparação dos custos de investimento




(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando os resultados da tabela 11 e da figura 14 verifica-se que o sistema convencional de tratamento para a remoção de ferro e de manganês apresenta custo de investimento mais atrativo que o sistema de nanofiltração. Contudo, o sistema de nanofiltração, conforme Castañeda (2010), apresenta alta eficiência para a remoção dos metais presentes na água bruta, tornando-a adequada ao consumo humano.

Os custos relativos à operação dos sistemas foram obtidos considerando-se as despesas com reposição de material, mão-de-obra, produtos químicos e energia elétrica em função do volume produzido ao longo do horizonte de projeto, conforme mostram as tabela 12 e 13.

Tabela 12– Custo anual operacional para o sistema convencional

| ANO | REPOSIÇÃO (R$/ano) | | | OPERAÇÃO (R$/ano) | | | TOTAL (R$/ano) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | DOSADORES | EQ. LABOR. | MEIO FILTRANTE | PROD. QUÍMICO | MÃO-DE-OBRA | EN. ELÉTRICA | |
| 2017 | | | | R$ 23.367,95 | R$ 241.509,11 | R$ 80.461,47 | R$ 345.338,53 |
| 2018 | | | | R$ 23.089,36 | R$ 238.629,86 | R$ 79.502,22 | R$ 341.221,43 |
| 2019 | | | | R$ 23.488,37 | R$ 242.753,64 | R$ 80.876,10 | R$ 347.118,11 |
| 2020 | | | | R$ 23.887,38 | R$ 246.877,43 | R$ 82.249,99 | R$ 353.014,80 |
| 2021 | | | | R$ 24.233,18 | R$ 250.451,38 | R$ 83.440,69 | R$ 358.125,26 |
| 2022 | R$ 61.988,94 | | | R$ 24.578,99 | R$ 254.025,33 | R$ 84.631,39 | R$ 425.224,66 |
| 2023 | | | | R$ 24.904,85 | R$ 257.393,09 | R$ 85.753,40 | R$ 368.051,34 |
| 2024 | | | | R$ 25.224,06 | R$ 260.692,12 | R$ 86.852,51 | R$ 372.768,69 |
| 2025 | | R$ 31.944,98 | R$ 15.369,43 | R$ 25.536,62 | R$ 263.922,42 | R$ 87.928,72 | R$ 424.702,17 |
| 2026 | | | | R$ 24.684,07 | R$ 255.111,26 | R$ 84.993,18 | R$ 364.788,51 |
| 2027 | | | | R$ 24.938,67 | R$ 257.742,63 | R$ 85.869,85 | R$ 368.551,16 |
| 2028 | | | | R$ 25.186,91 | R$ 260.308,22 | R$ 86.724,61 | R$ 372.219,74 |
| 2029 | R$ 61.988,94 | | | R$ 25.447,88 | R$ 263.005,37 | R$ 87.623,19 | R$ 438.065,39 |
| 2030 | | | | R$ 25.702,49 | R$ 265.636,74 | R$ 88.499,86 | R$ 379.839,09 |
| 2031 | | | | R$ 25.912,54 | R$ 267.807,62 | R$ 89.223,12 | R$ 382.943,28 |
| 2032 | | | | R$ 26.109,86 | R$ 269.846,93 | R$ 89.902,54 | R$ 385.859,33 |
| 2033 | | | | R$ 26.307,18 | R$ 271.886,24 | R$ 90.581,96 | R$ 388.775,38 |
| 2034 | | | | R$ 26.491,77 | R$ 273.793,98 | R$ 91.217,54 | R$ 391.503,30 |
| 2035 | | R$ 31.944,98 | R$ 15.369,43 | R$ 26.669,99 | R$ 275.635,94 | R$ 91.831,21 | R$ 441.451,56 |
| 2036 | R$ 61.988,94 | | | R$ 26.803,66 | R$ 277.017,41 | R$ 92.291,46 | R$ 458.101,48 |
| 2037 | | | | R$ 26.930,96 | R$ 278.333,10 | R$ 92.729,80 | R$ 397.993,86 |
| 2038 | | | | R$ 27.064,63 | R$ 279.714,57 | R$ 93.190,05 | R$ 399.969,25 |
| 2039 | | | | R$ 27.185,57 | R$ 280.964,47 | R$ 93.606,47 | R$ 401.756,51 |
| 2040 | | | | R$ 27.312,87 | R$ 282.280,15 | R$ 94.044,80 | R$ 403.637,83 |

(fonte: elaborado pelo autor)

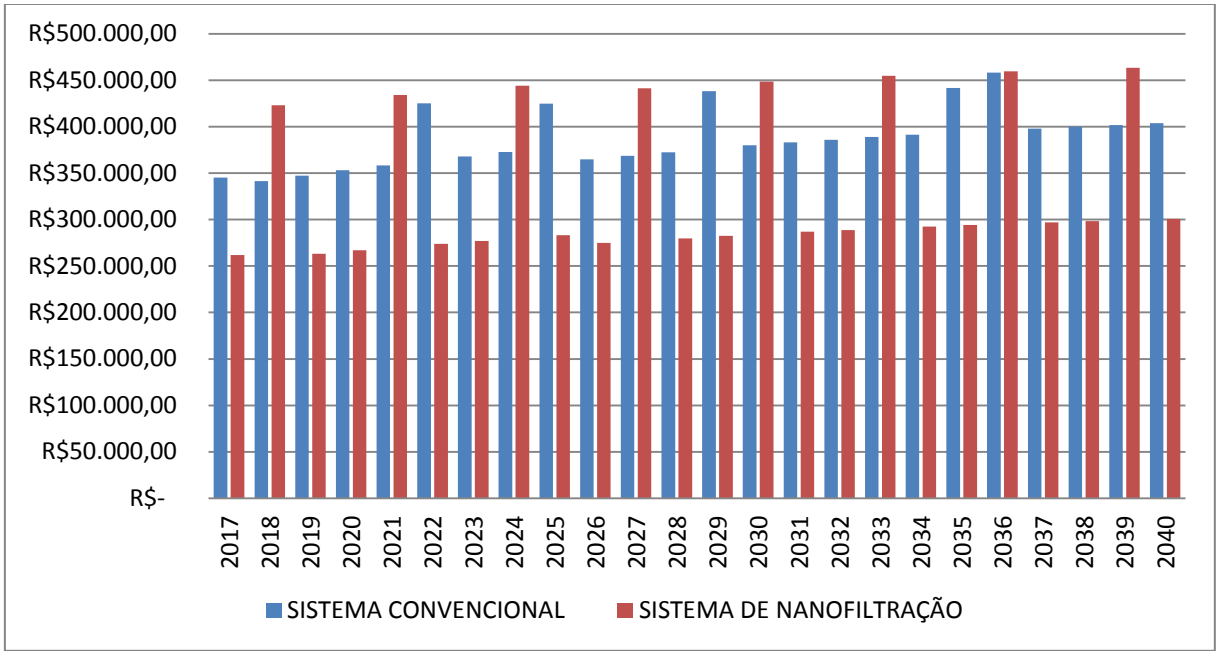
Tabela 13– Custo anual operacional para o sistema de nanofiltração

| ANO | REPOSIÇÃO (R$/ano) | | OPERAÇÃO (R$/ano) | | | TOTAL (R$/ano) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | MEMBRANAS | FILTROS | PROD. QUÍMICO | MÃO-DE-OBRA | EN. ELÉTRICA | |
| 2017 | | R$ 31.752,00 | R$ 85.462,32 | R$ 68.503,78 | R$ 76.131,47 | R$ 261.849,56 |
| 2018 | R$ 163.800,00 | R$ 31.752,00 | R$ 84.443,44 | R$ 67.687,08 | R$ 75.223,84 | R$ 422.906,36 |
| 2019 | | R$ 31.752,00 | R$ 85.902,72 | R$ 68.856,79 | R$ 76.523,79 | R$ 263.035,30 |
| 2020 | | R$ 31.752,00 | R$ 87.362,00 | R$ 70.026,50 | R$ 77.823,74 | R$ 266.964,23 |
| 2021 | R$ 163.800,00 | R$ 31.752,00 | R$ 88.626,70 | R$ 71.040,25 | R$ 78.950,36 | R$ 434.169,31 |
| 2022 | | R$ 31.752,00 | R$ 89.891,41 | R$ 72.053,99 | R$ 80.076,99 | R$ 273.774,39 |
| 2023 | | R$ 31.752,00 | R$ 91.083,15 | R$ 73.009,25 | R$ 81.138,61 | R$ 276.983,02 |
| 2024 | R$ 163.800,00 | R$ 31.752,00 | R$ 92.250,57 | R$ 73.945,02 | R$ 82.178,57 | R$ 443.926,16 |
| 2025 | | R$ 31.752,00 | R$ 93.393,67 | R$ 74.861,29 | R$ 83.196,87 | R$ 283.203,83 |
| 2026 | | R$ 31.752,00 | R$ 90.275,68 | R$ 72.362,02 | R$ 80.419,31 | R$ 274.809,00 |
| 2027 | R$ 163.800,00 | R$ 31.752,00 | R$ 91.206,84 | R$ 73.108,40 | R$ 81.248,80 | R$ 441.116,04 |
| 2028 | | R$ 31.752,00 | R$ 92.114,72 | R$ 73.836,13 | R$ 82.057,55 | R$ 279.760,40 |
| 2029 | | R$ 31.752,00 | R$ 93.069,15 | R$ 74.601,17 | R$ 82.907,78 | R$ 282.330,11 |
| 2030 | R$ 163.800,00 | R$ 31.752,00 | R$ 94.000,31 | R$ 75.347,55 | R$ 83.737,28 | R$ 448.637,14 |
| 2031 | | R$ 31.752,00 | R$ 94.768,52 | R$ 75.963,32 | R$ 84.421,61 | R$ 286.905,45 |
| 2032 | | R$ 31.752,00 | R$ 95.490,16 | R$ 76.541,77 | R$ 85.064,46 | R$ 288.848,40 |
| 2033 | R$ 163.800,00 | R$ 31.752,00 | R$ 96.211,81 | R$ 77.120,22 | R$ 85.707,32 | R$ 454.591,35 |
| 2034 | | R$ 31.752,00 | R$ 96.886,90 | R$ 77.661,35 | R$ 86.308,70 | R$ 292.608,95 |
| 2035 | | R$ 31.752,00 | R$ 97.538,71 | R$ 78.183,82 | R$ 86.889,35 | R$ 294.363,87 |
| 2036 | R$ 163.800,00 | R$ 31.752,00 | R$ 98.027,57 | R$ 78.575,67 | R$ 87.324,83 | R$ 459.480,07 |
| 2037 | | R$ 31.752,00 | R$ 98.493,15 | R$ 78.948,86 | R$ 87.739,58 | R$ 296.933,59 |
| 2038 | | R$ 31.752,00 | R$ 98.982,00 | R$ 79.340,71 | R$ 88.175,06 | R$ 298.249,78 |
| 2039 | R$ 163.800,00 | R$ 31.752,00 | R$ 99.424,30 | R$ 79.695,25 | R$ 88.569,07 | R$ 463.240,62 |
| 2040 | | R$ 31.752,00 | R$ 99.889,88 | R$ 80.068,44 | R$ 88.983,82 | R$ 300.694,14 |

(fonte: elaborado pelo autor)

Com base nas tabelas 12 e 13 foi obtida a figura 16 para uma melhor visualização dos custos operacionais de ambos os sistemas de tratamento.

Figura 16 – Comparação dos custos de operação




(fonte: elaborado pelo autor)

A partir das tabelas 12 e 13 e da figura 16 observa-se que os custos de operação ao longo do horizonte do projeto para o sistema de nanofiltração tornam-se mais atrativos. Embora haja elevados custos com a reposição das membranas, o sistema de nanofiltração ainda apresenta custos operacionais mais atrativos que o sistema convencional. Ressalta-se que o sistema convencional também apresenta-se com elevados custos com a reposição de materiais, como pode ser observado nas tabelas 12 e 13 e na figura 15.

A tabela 14 representa os custos totais de investimento e operacionais para os sistemas. Nela é mostrado o cálculo para o valor presente, o que permite determinar o custo marginal dos sistemas de tratamento.

Tabela 14– Valor presente dos custos de investimento e operacionais dos sistemas

| ANO | VOLUME (m³/ano) | CONVENCIONAL (R$/ano) | NANOFILTRAÇÃO (R$/ano) |
|---|---|---|---|
| 2016 | | R$ 1.307.297,80 | R$ 1.717.452,03 |
| 2017 | 245.208 | R$ 345.338,53 | R$ 261.849,56 |
| 2018 | 242.284 | R$ 341.221,43 | R$ 422.906,36 |
| 2019 | 246.471 | R$ 347.118,11 | R$ 263.035,30 |
| 2020 | 250.658 | R$ 353.014,80 | R$ 266.964,23 |
| 2021 | 254.287 | R$ 358.125,26 | R$ 434.169,31 |
| 2022 | 257.916 | R$ 425.224,66 | R$ 273.774,39 |
| 2023 | 261.335 | R$ 368.051,34 | R$ 276.983,02 |
| 2024 | 264.685 | R$ 372.768,69 | R$ 443.926,16 |
| 2025 | 267.964 | R$ 424.702,17 | R$ 283.203,83 |
| 2026 | 259.018 | R$ 364.788,51 | R$ 274.809,00 |
| 2027 | 261.690 | R$ 368.551,16 | R$ 441.116,04 |
| 2028 | 264.295 | R$ 372.219,74 | R$ 279.760,40 |
| 2029 | 267.033 | R$ 438.065,39 | R$ 282.330,11 |
| 2030 | 269.705 | R$ 379.839,09 | R$ 448.637,14 |
| 2031 | 271.909 | R$ 382.943,28 | R$ 286.905,45 |
| 2032 | 273.980 | R$ 385.859,33 | R$ 288.848,40 |
| 2033 | 276.050 | R$ 388.775,38 | R$ 454.591,35 |
| 2034 | 277.987 | R$ 391.503,30 | R$ 292.608,95 |
| 2035 | 279.857 | R$ 441.451,56 | R$ 294.363,87 |
| 2036 | 281.260 | R$ 458.101,48 | R$ 459.480,07 |
| 2037 | 282.596 | R$ 397.993,86 | R$ 296.933,59 |
| 2038 | 283.998 | R$ 399.969,25 | R$ 298.249,78 |
| 2039 | 285.267 | R$ 401.756,51 | R$ 463.240,62 |
| 2040 | 286.603 | R$ 403.637,83 | R$ 300.694,14 |
| TOTAL | 2.008.300 | R$ 4.210.281,78 | R$ 4.272.373,80 |

(fonte: elaborado pelo autor)

Com base na tabela 14, foram obtidos os custos marginais para os sistemas de tratamento convencional e nanofiltração substituindo-se os respectivos valores na equação 6, conforme mostrado abaixo.

$$CM = R\$\ 4.210.281,78 / 2.008.300\ m^3 = R\$\ 2,10/m^3$$

$$CM = R\$\ 4.552.343,42 / 2.008.300\ m^3 = R\$\ 2,13/m^3$$

Analisando os valores calculados verifica-se que os custos de produção dos sistemas equiparam-se, mostrando o potencial econômico do sistema de separação por nanofiltração para a remoção de ferro e manganês no tratamento de água para abastecimento público.

# 13 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho comparou os custos de implantação do sistema convencional para a remoção de ferro e de manganês do município de Capivari do Sul com o sistema de nanofiltração. Para isso, foi obtido o custo de investimento e operação do sistema de nanofiltração através de consulta à empresa especializada. Para o sistema convencional, os custos foram obtidos através do Projeto Executivo do SAA do município de Capivari do Sul desenvolvido pela CORSAN e baseado nas condições operacionais da CORSAN.

Pode-se afirmar que a questão deste trabalho foi respondida. E que a hipótese está correta ao afirmar, que há viabilidade econômica no emprego de nanofiltração para a remoção de ferro e de manganês presentes em águas subterrâneas, em comparação com o processo de aeração a ser implantado no município de Capivari do Sul.

Quando comparados os custos de investimento, o sistema de nanofiltração apresenta valor inicial (R$ 1.711.452,03) superior ao sistema convencional (R$ 1.307.297,80). Porém os custos operacionais ao longo do plano tornam o sistema de nanofiltração competitivo com o convencional, mesmo havendo a necessidade de investimentos com a reposição das membranas a cada 3 anos.

A avaliação comparativa entre os sistemas de nanofiltração e o tratamento convencional, baseada nos custos de produção, demonstra o menor custo associado ao sistema convencional (R$ 2,10/m³). Contudo, o sistema de nanofiltração mostra-se bastante competitivo, com um custo de tratamento de R$ 2,13/m³.

Esses resultados demonstram o potencial de utilização dos processos de separação por membranas para o tratamento de água para abastecimento, ao mesmo tempo em que eliminam algumas distorções sobre a percepção de seus custos.

Um exemplo de sucesso na utilização dos processos de separação por membranas é a construção de usinas de dessalinização em Israel, o qual o metro cúbico de água custa US$ 0,53 (R$ 1,67). A alternativa de tratar a água do mar é por causa da escassez ou grande distância das fontes naturais de água doce (FRANCO, 2011).

Desta forma, sugere-se que sejam desenvolvidos estudos e pesquisas relacionados a complementação de tratamento convencional com os processos de separação por membranas, não apenas para a sua aplicação, mas para uma análise mais detalhada dos custos envolvidos.

# REFERÊNCIAS

ALVES, D. N. B. **Remoção de ferro em águas de irrigação através de filtragem em areia e zeólita**. 2008. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Curso de Engenharia Agrícola, Lavras, 2008.

AMORIM, F. F. **Remoção dos compostos orgânicos β-estradiol e saxitoxinas (STX, Neo-STX e dc-STX) por meio de nanofiltração: avaliação em escala de bancada**. 2007. 133 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2007.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2.914**, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, 2011. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso em: 08 abr. 2016.

CAPIVARI DO SUL. Prefeitura Municipal. **Plano Municipal de Saneamento Básico: gestão integrada de resíduos sólidos, abastecimento de água, esgotamento sanitário e drenagem urbana**. 2012. Disponível em: <http://www.camaracapivaridosul.rs.gov.br/>. Acesso em: 14 ago. 2016.

CAPIVARI DO SUL. Prefeitura Municipal. **http://www.capivaridosul.rs.gov.br/novo_site/**. Acesso em: 22 ago. 2016.

CASTEÑEDA, D. M. A. **Remoção de sulfeto de hidrogênio, ferro e manganês de águas de abastecimento através dos processos de dessorção gasosa, nanofiltração e oxidação com permanganato de potássio**. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2010.

CHEIS. D. Nanotecnologia aplicada em sistemas de filtragem por membrana. **Revista Meio Filtrante**, ed. 65, nov./dez. 2013. Disponível em: <http://www.revistatae.com.br/noticiaInt.asp?id=6778>. Acesso em: 23 mar. 2016.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO. **Laudo Hidrogeológico de Capivari do Sul/RS**. Porto Alegre, 2011.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO. **Projeto Executivo do Sistema de Abastecimento de Água (SAA) de Capivari do Sul/RS: Projeto Hidromecânico/Arquitetônico – Memorial Descritivo**. Porto Alegre, 2012. v. 1.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água**. 1. ed. São Carlos: Editora LDiBe Ltda, 2008. v. 1 e 2.

DI BERNARDO, L.; MINILLO, A.; DANTAS, A. D. B. **Florações de algas e de cianobactérias: suas influências na qualidade da água e nas tecnologias de tratamento**. 1. ed. São Carlos: Editora LDiBe Ltda, 2010.

FERREIRA, M. A. S. **Nanofiltração à escala laboratorial na remoção de cianotoxinas**. 2010. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Faro, 2010.

FRANCO. E. As lições de Israel. **ISTO É**, ed. 2166 18.05. 2011. Disponível em: <http://istoe.com.br/137099_AS+LICOES+DE+ISRAEL/>. Acesso em: 15 dez. 2016.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de separação com membranas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora E-papers, 2006.

LEAL, M. J. C. **Remoção de matéria húmica aquática, ferro e manganês de águas para abastecimento por meio de coagulação, floculação, sedimentação e filtração com membranas**. 2013. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2013.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas: Átomo, 2010.

MADEIRA, V. S. **Desenvolvimento de um carvão adsorvente para remoção de íons ferro em águas naturais**. 2003. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Santa Catarina, 2003.

METCALF; EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Oxidação e remoção de ferro e manganês em águas para fins de abastecimento público ou industrial: uma abordagem geral. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 4, n. 1, abr. 2012. Disponível: <http://www.revistaret.com.br/ojs-2.2.3/index.php/ret/article/viewFile/97/136>. Acesso em: 26 abr. 2016.

OLIVEIRA, T. F. **Tratamento de água para abastecimento público por sistemas de separação por membrana de ultrafiltração: estudo de caso na ETA Alto da Boa Vista (São Paulo, SP)**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2010.

PADUA, V. L. **Remoção de microorganismos emergentes e microcontaminates orgânicos no tratamento de água para consumo humano**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB, 2010. v. 1.

RAMOS, M. H. C. **Remoção de cor, ferro e manganês de água com matéria orgânica dissolvida por pré-oxidação com dióxido de cloro, coagulação e filtração**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade de Ribeirão Preto, Tecnologia Ambiental, Ribeirão Preto, 2010.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

RUBIM, C. A beleza do tratamento da água. **Revista TAE**: especializada em tratamento de água & efluentes, Santo André, ed. 08, 03 ago. 2012. Disponível em: <http://www.revistatae.com.br/artigos.asp?id=89&fase=c>. Acesso em: 03 maio 2016.

SAMPAIO, C. A. A. **Remoção de ferro e manganês pelo pré-tratamento de águas de abastecimento com permanganato de potássio**. 1995. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, 1995.

SCHLEICHER, A. T. **Remoção de estrona, estradiol, etinilestradiol e bisfenol-A por meio de nanofiltração aplicada ao tratamento avançado de águas para consumo humano**. 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2013.

SCHNEIDER, R. P; TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para tratamento de água, esgoto e água de reúso**. 1. ed. São Paulo: Editora ABES, 2001.

# ANEXO A – Ensaios Físico-Químico do Poço CPV-01 da Água Bruta

**COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO**
**DIRETORIA DE OPERAÇÕES**
**SUPERINTENDÊNCIA DE TRATAMENTO**

Pág.: 1

***CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E BACTERIOLÓGICAS DA ÁGUA BRUTA***

Período: 2014 a 2014

PROCEDÊNCIA: CAPIVARI DO SUL - Poço com filtração

MANANCIAL: CPV-01

EXAMES E ANÁLISES EXECUTADAS NO LABORATÓRIO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

| DATA | FÍSICO - QUÍMICAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | BACTERIOLÓGICO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Turbidez mg/L SiO2 | | | Cor mg/L Pt | | | pH | | | Alcalinidade mg/L CaCO3 | | | Ferro Total mg/L Fe | | | Manganês Total mg/L Mn | | | DBO | NMP total por 100 mL Termotolerantes |
| | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Méd. | |
| 01/2014 | 1,7 | 0,0 | 1,2 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | < 2 |
| 02/2014 | 1,7 | 0,4 | 1,2 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,05 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 03/2014 | 1,6 | 0,0 | 1,1 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,02 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | > ou = 1600 |
| 04/2014 | 1,8 | 0,6 | 1,1 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | < 2 |
| 05/2014 | 1,1 | 0,4 | 0,8 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 06/2014 | 1,3 | 0,2 | 0,7 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | < 2 |
| 07/2014 | 1,0 | 0,4 | 0,6 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 08/2014 | 1,0 | 0,4 | 0,7 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 09/2014 | 10 | 0,4 | 0,7 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 10/2014 | 1,2 | 0,6 | 0,8 | | | | | | | | | | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 11/2014 | 1,1 | 0,4 | 0,8 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 12/2014 | 1,1 | 0,3 | 0,8 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |

**COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO**
**DIRETORIA DE OPERAÇÕES**
**SUPERINTENDÊNCIA DE TRATAMENTO**

Pág.: 2

***CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E BACTERIOLÓGICAS DA ÁGUA BRUTA***

Período: 2015 a 2015

PROCEDÊNCIA: CAPIVARI DO SUL - Poço com filtração

MANANCIAL: CPV-01

EXAMES E ANÁLISES EXECUTADAS NO LABORATÓRIO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

| DATA | FÍSICO - QUÍMICAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | BACTERIOLÓGICO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Turbidez mg/L SiO2 | | | Cor mg/L Pt | | | pH | | | Alcalinidade mg/L CaCO3 | | | Ferro Total mg/L Fe | | | Manganês Total mg/L Mn | | | DBO | NMP total por 100 mL Termotolerantes |
| | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Méd. | |
| 01/2015 | 1,2 | 0,3 | 0,8 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 02/2015 | 1,1 | 0,5 | 0,7 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 03/2015 | 1,3 | 0,0 | 0,7 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,02 | 0,0 | 0,01 | 0,0 | |
| 04/2015 | 10 | 0,0 | 0,6 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,02 | 0,0 | 0,01 | 0,0 | < 2 |
| 05/2015 | 1,0 | 0,4 | 0,6 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,02 | 0,0 | 0,02 | 0,0 | |
| 06/2015 | 0,7 | 0,3 | 0,5 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,0 | < 2 |
| 07/2015 | 0,7 | 0,3 | 0,5 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,0 | < 2 |
| 08/2015 | 0,9 | 0,2 | 0,5 | | | | | | | | | | 0,9 | 0,7 | 0,7 | 0,05 | 0,02 | 0,05 | 0,0 | < 2 |
| 09/2015 | 0,6 | 0,0 | 0,5 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,0 | < 2 |
| 10/2015 | | | | | | | | | | | | | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,05 | 0,02 | 0,03 | 0,0 | < 2 |
| 11/2015 | 0,7 | 0,3 | 0,5 | | | | | | | | | | 0,6 | 0,1 | 0,6 | 0,16 | 0,05 | 0,07 | 0,0 | < 2 |
| 12/2015 | 0,8 | 0,4 | 0,6 | | | | | | | | | | 0,9 | 0,5 | 0,7 | 0,08 | 0,05 | 0,06 | 0,0 | < 2 |

**COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO**
**DIRETORIA DE OPERAÇÕES**
**SUPERINTENDÊNCIA DE TRATAMENTO**



***CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E BACTERIOLÓGICAS DA ÁGUA BRUTA***

Período: 2016 a 2016

PROCEDÊNCIA: CAPIVARI DO SUL - Poço com filtração

MANANCIAL: CPV-01

EXAMES E ANÁLISES EXECUTADAS NO LABORATÓRIO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

| DATA | FÍSICO - QUÍMICAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | BACTERIOLÓGICO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Turbidez mg/L SiO2 | | | Cor mg/L Pt | | | pH | | | Alcalinidade mg/L CaCO3 | | | Ferro Total mg/L Fe | | | Manganês Total mg/L Mn | | | DBO | NMP total por 100 mL Termotolerantes |
| | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Méd. | |
| 01/2016 | 0,6 | 0,2 | 0,4 | | | | | | | | | | 0,9 | 0,0 | 0,6 | 0,41 | 0,0 | 0,07 | 0,0 | < 2 |
| 02/2016 | 0,9 | 0,2 | 0,4 | | | | | | | | | | 0,6 | 0,4 | 0,5 | 0,10 | 0,02 | 0,05 | 0,0 | < 2 |
| 03/2016 | 2,0 | 0,2 | 0,4 | | | | | | | | | | 0,8 | 0,1 | 0,4 | 0,11 | 0,01 | 0,06 | 0,0 | < 2 |
| 04/2016 | 0,5 | 0,0 | 0,2 | | | | | | | | | | 1,0 | 0,2 | 0,6 | 0,44 | 0,0 | 0,18 | 0,0 | < 2 |
| 05/2016 | 0,5 | 0,0 | 0,3 | | | | | | | | | | 0,8 | 0,6 | 0,7 | 0,32 | 0,0 | 0,12 | 0,0 | < 2 |
| 06/2016 | 0,4 | 0,0 | 0,1 | | | | | | | | | | 1,3 | 0,7 | 0,8 | 0,21 | 0,03 | 0,10 | 0,0 | < 2 |
| 07/2016 | 2,8 | 0,1 | 0,5 | | | | | | | | | | 0,7 | 0,5 | 0,6 | 0,26 | 0,07 | 0,17 | 0,0 | < 2 |
| 08/2016 | 0,7 | 0,2 | 0,4 | | | | | | | | | | 0,8 | 0,4 | 0,6 | 0,16 | 0,03 | 0,10 | 0,0 | < 2 |
| 09/2016 | 0,9 | 0,3 | 0,5 | | | | | | | | | | 1,0 | 0,6 | 0,7 | 0,15 | 0,0 | 0,08 | 0,0 | < 2 |
| 10/2016 | 0,7 | 0,3 | 0,5 | | | | | | | | | | 0,8 | 0,2 | 0,5 | 0,15 | 0,02 | 0,09 | 0,0 | < 2 |
| 11/2016 | 0,7 | 0,3 | 0,5 | | | | | | | | | | 0,8 | 0,0 | 0,4 | 0,28 | 0,00 | 0,09 | 0,0 | < 2 |
| 12/2016 | 0,6 | 0,2 | 0,4 | | | | | | | | | | 0,9 | 0,0 | 0,6 | 0,41 | 0,0 | 0,07 | 0,0 | < 2 |

# ANEXO B – Ensaios Físico-Químico do Poço CPV-01 da Água Tratada

**COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO**
**DIRETORIA DE OPERAÇÕES**
**SUPERINTENDÊNCIA DE TRATAMENTO**

Pág.: 1

***CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E BACTERIOLÓGICAS DA ÁGUA TRATADA***

Período: 2014 a 2014

PROCEDÊNCIA: CAPIVARI DO SUL - Poço com filtração

EXAMES E ANÁLISES EXECUTADAS NO LABORATÓRIO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

| DATA | FÍSICO - QUÍMICAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | BACTERIOLÓGICO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Turbidez mg/L SiO2 | | | Cor mg/L Pt | | | pH | | | Ferro Total mg/L Fe | | | Manganês Total mg/L Mn | | | Flúor mg/L F | | | NMP total por 100 mL Coliformes Totais (*) |
| | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | |
| 01/2014 | 1,3 | 0,0 | 0,8 | 10 | 2 | 6 | 7,9 | 7,5 | 7,7 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,2 | 0,4 | 0,8 | ND |
| 02/2014 | 1,3 | 0,2 | 0,9 | 10 | 5 | 6 | 7,8 | 7,2 | 7,6 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,02 | 0,0 | 0,0 | 1,3 | 0,3 | 0,7 | ND |
| 03/2014 | 1,1 | 0,0 | 0,8 | 8 | 2 | 6 | 8 | 7,4 | 7,5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,02 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 0,3 | 0,7 | ND |
| 04/2014 | 1,4 | 0,0 | 0,8 | 8 | 5 | 8 | 7,8 | 7,5 | 7,7 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,1 | 0,5 | 0,7 | ND |
| 05/2014 | 1,0 | 0,4 | 0,6 | 8 | 5 | 8 | 7,7 | 7,3 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,2 | 0,5 | 0,7 | ND |
| 06/2014 | 0,9 | 0,2 | 0,5 | 8 | 5 | 6 | 7,8 | 7,5 | 7,7 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 0,6 | 0,7 | ND |
| 07/2014 | 0,7 | 0,2 | 0,2 | 10 | 5 | 6 | 7,7 | 7,4 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 0,5 | 0,7 | ND |
| 08/2014 | 0,7 | 0,2 | 0,4 | 10 | 5 | 7 | 7,7 | 7,4 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 0,5 | 0,7 | ND |
| 09/2014 | 0,6 | 0,2 | 0,4 | 10 | 5 | 7 | 7,7 | 7,5 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 0,5 | 0,7 | ND |
| 10/2014 | 0,7 | 0,3 | 0,6 | 10 | 5 | 9 | 7,7 | 7,5 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 0,5 | 0,7 | ND |
| 11/2014 | 1,0 | 0,1 | 0,5 | 8 | 5 | 7 | 7,6 | 7,5 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,9 | 0,4 | 0,7 | ND |
| 12/2014 | 0,9 | 0,2 | 0,6 | 8 | 2 | 6 | 7,6 | 7,5 | 7,5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 0,3 | 0,8 | ND |

* ND = NÃO DETECTADO

**COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO**
**DIRETORIA DE OPERAÇÕES**
**SUPERINTENDÊNCIA DE TRATAMENTO**

Pág.: 2

***CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E BACTERIOLÓGICAS DA ÁGUA TRATADA***

Período: 2015 a 2015

PROCEDÊNCIA: CAPIVARI DO SUL - Poço com filtração

EXAMES E ANÁLISES EXECUTADAS NO LABORATÓRIO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

| DATA | FÍSICO - QUÍMICAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | BACTERIOLÓGICO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Turbidez mg/L SiO2 | | | Cor mg/L Pt | | | pH | | | Ferro Total mg/L Fe | | | Manganês Total mg/L Mn | | | Flúor mg/L F | | | NMP total por 100 mL Coliformes Totais (*) |
| | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | |
| 01/2015 | 1,3 | 0,3 | 0,6 | 10 | 2 | 4 | 7,6 | 7,1 | 7,2 | 2,2 | 0,1 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 0,5 | 0,7 | ND |
| 02/2015 | 1,2 | 0,3 | 0,5 | 8 | 2 | 3 | 7,5 | 7,2 | 7,4 | 1,0 | 0,1 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,9 | 0,4 | 0,6 | ND |
| 03/2015 | 0,9 | 0,0 | 0,4 | 2 | 2 | 2 | 7,7 | 7,5 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,8 | 0,3 | 0,6 | ND |
| 04/2015 | 0,7 | 0,0 | 0,4 | 5 | 2 | 3 | 7,7 | 7,5 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,9 | 0,4 | 0,6 | ND |
| 05/2015 | 0,5 | 0,1 | 0,3 | 2 | 2 | 2 | 7,7 | 7,2 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,9 | 0,5 | 0,7 | ND |
| 06/2015 | 0,4 | 0,1 | 0,3 | 2 | 2 | 2 | 7,6 | 7,3 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,8 | 0,5 | 0,6 | ND |
| 07/2015 | 0,6 | 0,1 | 0,3 | 2 | 2 | 2 | 7,6 | 7,5 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,02 | 0,0 | 0,02 | | | | ND |
| 08/2015 | 1,0 | 0,2 | 0,3 | 2 | 2 | 2 | 7,7 | 7,5 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,02 | 0,03 | 1,0 | 0,3 | 0,7 | ND |
| 09/2015 | 0,3 | 0,0 | 0,2 | 2 | 2 | 2 | 7,7 | 7,5 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,9 | 0,4 | 0,7 | ND |
| 10/2015 | 1,0 | 0,0 | 0,5 | 2 | 2 | 2 | 7,8 | 7,6 | 7,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,9 | 0,6 | 0,7 | ND |
| 11/2015 | 0,4 | 0,1 | 0,2 | 5 | 2 | 2 | 7,8 | 7,5 | 7,6 | 0,7 | 0,1 | 0,2 | 0,10 | 0,03 | 0,06 | | | | ND |
| 12/2015 | 0,5 | 0,2 | 0,3 | 19 | 3 | 4 | 8 | 7,4 | 7,7 | 1,0 | 0,2 | 0,4 | 0,05 | 0,02 | 0,03 | | | | ND |

* ND = NÃO DETECTADO

**COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO**
**DIRETORIA DE OPERAÇÕES**
**SUPERINTENDÊNCIA DE TRATAMENTO**



***CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E BACTERIOLÓGICAS DA ÁGUA TRATADA***

Período: 2016 a 2016

PROCEDÊNCIA: CAPIVARI DO SUL - Poço com filtração

EXAMES E ANÁLISES EXECUTADAS NO LABORATÓRIO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

| DATA | FÍSICO - QUÍMICAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | BACTERIOLÓGICO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Turbidez mg/L SiO2 | | | Cor mg/L Pt | | | pH | | | Ferro Total mg/L Fe | | | Manganês Total mg/L Mn | | | Flúor mg/L F | | | NMP total por 100 mL Coliformes Totais (*) |
| | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | Máx. | Mín. | Méd. | |
| 1/2016 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 7 | 3 | 4 | 8,4 | 7,1 | 7,9 | 0,4 | 0,0 | 0,2 | 0,11 | 0,0 | 0,03 | 1,4 | 0,4 | 0,7 | ND |
| 2/2016 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 5 | 3 | 4 | 8,4 | 7,8 | 8 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,0 | 0,03 | 1,3 | 0,6 | 0,8 | ND |
| 3/2016 | 0,6 | 0,1 | 0,2 | 10 | 1 | 3 | 8,5 | 7,7 | 8,1 | 0,6 | 0,1 | 0,3 | 0,06 | 0,0 | 0,01 | 1,2 | 0,4 | 0,6 | ND |
| 4/2016 | 0,4 | 0,0 | 0,1 | 9 | 1 | 3 | 8,6 | 7,4 | 8 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,29 | 0,0 | 0,05 | 0,8 | 0,2 | 0,5 | ND |
| 5/2016 | 0,4 | 0,0 | 0,1 | 4 | 1 | 3 | 8,3 | 7,9 | 8 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,04 | 0,0 | 0,01 | 0,7 | 0,4 | 0,6 | ND |
| 6/2016 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 5 | 1 | 3 | 8,2 | 7,6 | 7,9 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,07 | 0,0 | 0,02 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | ND |
| 7/2016 | 2,6 | 0,1 | 0,3 | 6 | 3 | 4 | 8,1 | 7 | 7,7 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,19 | 0,0 | 0,1 | | | | ND |
| 8/2016 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 6 | 1 | 4 | 7,9 | 7,3 | 7,5 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 0,28 | 0,0 | 0,04 | 0,7 | 0,2 | 0,6 | ND |
| 9/2016 | 0,7 | 0,1 | 0,2 | 8 | 2 | 4 | 7,6 | 7,3 | 7,5 | 0,5 | 0,1 | 0,1 | 0,02 | 0,0 | 0,0 | 1,2 | 0,3 | 0,7 | ND |
| 10/2016 | 0,8 | 0,1 | 0,3 | 5 | 0 | 3 | 7,6 | 7,3 | 7,5 | 0,3 | 0,0 | 0,1 | 0,06 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 0,1 | 0,8 | ND |
| 11/2016 | 0,4 | 0,1 | 0,3 | 6 | 1 | 3 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,06 | 0,0 | 0,01 | | | | ND |

* ND = NÃO DETECTADO

# ANEXO C – Ensaios Físico-Químico do Poço CPV-02 da Água Bruta

**COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO**
**DIRETORIA DE OPERAÇÕES**
**SUPERINTENDÊNCIA DE TRATAMENTO**

## IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

Procedência: Capivari do Sul — Nº Inscrição: 7023/09
Tipo de Amostra: Poço — Local de Coleta: Poço 02 - CPV-02
Data e Hora: 9/11/09 9:40

## RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS EM ÁGUAS

| Parâmetros | Valor | Unidade | LDM | LQM | IM | Data do Ensaio | Método |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Alcalinidade Total | 142 | mg/L CaCO3 | 1 | 2 | - | 10/11/2009 | 2320 B |
| Bicarbonatos | 173 | mg/L HCO3- | 1 | 2 | - | 10/11/2009 | 2320 B |
| Cloretos | 34,4 | mg/L Cl- | 0,06 | 0,2 | - | 10/11/2009 | 4110 B |
| Condutividade | 336 | µS/cm à 25°C | 0,5 | 1,2 | 15 | 12/11/2009 | 2510 B |
| Cor | 20 | mg/L Pt-Co | 2 | 5 | - | 10/11/2009 | 2120 B |
| Cálcio | 16 | mg/L Ca | 0,09 | 0,22 | 1 | 11/11/2009 | 3500 Ca B |
| Dureza | 74 | mg/L CaCO3 | 0,4 | 1 | 5 | 11/11/2009 | 2340 C |
| Fluoretos | 0,7 | mg/L F- | 0,02 | 0,07 | - | 10/11/2009 | 4110 B |
| Magnésio | 8 | mg/L Mg | 0,04 | 0,11 | 2 | 11/11/2009 | 3500 Mg B |
| Nitratos | 0,04 | mg/L N | 0,01 | 0,03 | - | 10/11/2009 | 4110 B |
| Nitritos | NA | mg/L N | 0,002 | 0,005 | - | - | 4500 NO2- B |
| Amônia | 0,36 | mg/L NH3 | 0,05 | 0,12 | - | - | - |
| Nitrogênio Amoniacal | 0,3 | mg/L N | 0,04 | 0,1 | 0,1 | 11/11/2009 | FQ 024 |
| Nitrogênio Total | 0,34 | mg/L N | 0,2 | 0,4 | - | - | - |
| Nitrogênio Orgânico | ND | mg/L N | 0,2 | 0,4 | - | 12/11/2009 | 4500 Norg B |
| Odor | Vegetal 2 | - | - | - | - | 09/11/2009 | FQ 012 |
| pH | 7,7 à 21°C | - | - | - | 0,1 | 10/11/2009 | 4500 H+ B |
| Sulfatos | 2,28 | mg/L SO4-- | 0,59 | 1,59 | - | 10/11/2009 | 4110 B |
| Sólidos Dissolvidos Totais | 198 | mg/L | - | - | - | 09/11/2009 | 2540 C |
| Sólidos Totais | 227 | mg/L | - | - | - | 09/11/2009 | 2540 B |
| Turbidez | 5,2 | NTU | 0,25 | 0,62 | 0,6 | 10/11/2009 | 2130 B |

**Observações**

De acordo com a Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde: Cor acima do permitido, Turbidez acima do permitido.
O ensaio de Nitritos não foi realizado por problemas técnicos.

**Legenda**

NA - Não Analisado
IM - Incerteza de Medição
LDM - Limite de Detecção do Método
FQ - Método Corsan
ND - Não Detectado
LQM - Limite de Quantificação do Método

* Para efeito de comparação considerar para a Portaria 2914/2011 as mesmas unidades dos resultados expressos neste relatório. A faixa considerada para o parâmetro Fluoretos refere-se à Portaria 10/99 da Secretaria Estadual da Saúde.

Métodos de ensaio e preservação de acordo com o Standard Methods for Examination of Water and Wastewater - 21 th Edition of American Water Works Association - AWWA. Coleta realizada conforme POP 006 - Procedimento para Coleta de Amostras de Águas e a frequência é estabelecida pelo cliente. Este relatório só pode ser reproduzido na íntegra. Os resultados se referem somente a esta amostra. A incerteza de medição expadida relatada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator K, para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

**COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO**
**DIRETORIA DE OPERAÇÕES**
**SUPERINTENDÊNCIA DE TRATAMENTO**

## IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

Procedência: Capivari do Sul — Nº Inscrição: 7023/09
Tipo de Amostra: Poço — Local de Coleta: Poço 02 - CPV-02
Data e Hora: 9/11/09 9:40

## RESULTADOS DOS ENSAIOS DE METAIS EM ÁGUAS

### 1 Ensaios por Espectrofotometria de Absorção Atômica

| Parâmetros | Valor | Unidade | LDM | LQM | IM | Data do Ensaio | Método |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Alumínio Total | 0,359 | mg/L Al | 0,012 | 0,031 | - | 17/02/2010 | 3113 B |
| Chumbo Total | ND | mg/L Pb | 0,003 | 0,006 | - | 11/02/2010 | 3113 B |
| Cobre Total | ND | mg/L Cu | 0,02 | 0,05 | - | 05/02/2010 | 3111 B |
| Cromo Total | ND | mg/L Cr | 0,003 | 0,007 | - | 11/02/2010 | 3113 B |
| Cádmio Total | ND | mg/L Cd | 0,0005 | 0,0013 | - | 11/02/2010 | 3113 B |
| Ferro Total | 1,1 | mg/L Fe | 0,14 | 0,23 | 0,1 | 05/02/2010 | 3111 B |
| Manganês Total | 0,178 | mg/L Mn | 0,011 | 0,028 | 0,017 | 12/02/2010 | 3113 B |
| Potássio Total | 4,4 | mg/L K | 0,08 | 0,2 | - | 05/02/2010 | 3111 B |
| Sódio Total | 46 | mg/L Na | 1 | 2 | - | 05/02/2010 | 3111 B |
| Zinco Total | ND | mg/L Zn | 0,06 | 0,14 | - | 05/02/2010 | 3111 B |

**Observações**

De acordo com a Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde: Alumínio Total acima do permitido, Ferro Total acima do permitido, Manganês Total acima do permitido.

**Legenda**

NA - Não Analisado — LDM - Limite de Detecção do Método — ND - Não Detectado
IM - Incerteza de Medição — FQ - Método Corsan — LQM - Limite de Quantificação do Método

* Para efeito de comparação considerar para a Portaria 2914/2011 as mesmas unidades dos resultados expressos neste relatório.

Métodos de ensaio e preservação de acordo com o Standard Methods for Examination of Water and Wastewater - 21 th Edition of American Water Works Association - AWWA. Coleta realizada conforme POP 006 - Procedimento para Coleta de Amostras de Águas e a frequência é estabelecida pelo cliente. Este relatório só pode ser reproduzido na íntegra. Os resultados se referem somente a esta amostra. A incerteza de medição expadida relatada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator K, para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

2/2