



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE**

**ANÁLISE DE CONFORMIDADE DE INDICADORES SENTINELAS DA
QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO DE CAMPINA GRANDE - PB**

POLYANA DE BRITO JANUÁRIO

CAMPINA GRANDE - PB

MARÇO – 2013

POLYANA DE BRITO JANUÁRIO

**ANÁLISE DE CONFORMIDADE DE INDICADORES SENTINELAS DA
QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO DE CAMPINA GRANDE - PB**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre.

Área: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária

Orientadores: Prof. Dr. Rui de Oliveira

Profa. Dra. Celeide Maria Belmont Sabino Meira.

CAMPINA GRANDE - PB

MARÇO – 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- J35a Januário, Polyana de Brito.
Análise de conformidade de indicadores sentinelas da qualidade da água de abastecimento de Campina Grande - PB / Polyana de Brito Januário. – Campina Grande, 2013.
75 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2013.
"Orientação: Prof. Dr. Rui de Oliveira, Profa. Dra. Celeide Maria Belmont Sabino Meira".
Referências.
1. Vigilância da Qualidade da Água. 2. Indicadores Sentinelas.
3. Metodologia FMEA. 4. Árvore de Falhas. I. Oliveira, Rui.
II. Meira, Celeide Maria Belmont Sabino. III. Título.

CDU 628.1.03(043)

POLYANA DE BRITO JANUÁRIO

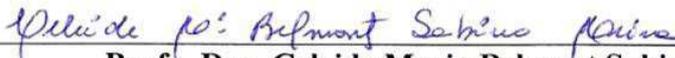
ANÁLISE DE CONFORMIDADE DE INDICADORES SENTINELAS DA
QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO DE CAMPINA GRANDE - PB

Dissertação aprovada em: 28 de fevereiro de 2013.

COMISSÃO EXAMINADORA



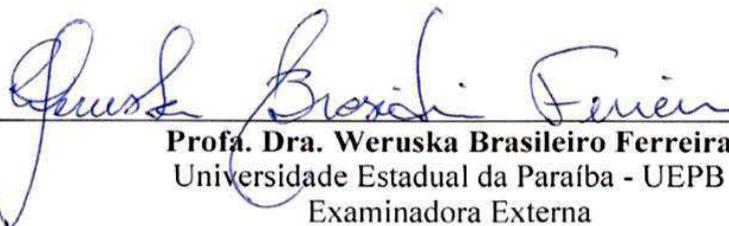
Prof. Dr. Rui de Oliveira - UEPB
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB
Orientador



Profa. Dra. Celeide Maria Belmont Sabino Meira
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB
Orientadora



Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Examinadora Interna



Profa. Dra. Weruska Brasileiro Ferreira
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB
Examinadora Externa

CAMPINA GRANDE – PB

MARÇO – 2013

*À Maria José e Genival pelo exemplo
de amor, paciência e dedicação.*

AGRADECIMENTOS

Ao Deus pela oportunidade de evolução espiritual e profissional, e pelo amparo nos instantes de dificuldades.

Aos meus pais, Maria José de B. Januário e Genival S. Januário, por acreditarem desde o início em meus esforços e minhas competências.

Aos meus irmãos, Genival S. J. Junior e Jéssica de B. Januário, pela paciência e compreensão quando da minha ausência nos poucos momentos a eles reservados.

Ao meu namorado, Pedro Nogueira da Silva Neto, pelo companheirismo, incentivo e participação em todas as fases desse trabalho.

Aos meus orientadores, Rui de Oliveira e Celeide M. B. S. Meira, por todo compromisso, dedicação e confiança. Levarei no meu caminho todos os ensinamentos passados.

À professora Ruth S. Nascimento pelas horas de auxílio e valiosa colaboração, indispensáveis a realização desta pesquisa.

A todos os professores e funcionários da Área de Engenharia Sanitária da UFCG pela experiência transmitida, pelos novos conhecimentos e pelo apoio.

Aos amigos Igor Ogata, Emanuel Campos, Juscelino Henriques, Cícero de Santana e Sarah Golzio, pelos conhecimentos compartilhados para o enriquecimento do trabalho.

Ao meu chefe no IFPB, Geraldo Juvito de Freitas, pelo apoio e compreensão em momentos de minha ausência.

À banca examinadora, Weruska B. Ferreira e Mônica de A. Coura, pelas valiosas contribuições.

À Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), na pessoa da arquiteta Alba Dornellas, pela disponibilidade no fornecimento das informações para a pesquisa.

Enfim, meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para que a concretização desse trabalho fosse alcançada.

RESUMO

O sistema de abastecimento de água é um conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, que se destinam à produção e distribuição canalizada de água potável para as populações. A qualidade da água, em um sistema de abastecimento, pode sofrer alterações durante seu percurso na rede de distribuição, o que demonstra a vulnerabilidade da água servida. A busca por metodologias que possibilitem a identificação de forma preventiva dos possíveis riscos à saúde associados à água de consumo é um dos desafios da vigilância da qualidade da água. Os indicadores sentinelas são instrumentos que atuam de forma precoce, eficaz e econômica na identificação dessas alterações que podem ocasionar doenças de transmissão hídrica, passíveis de prevenção e controle, através de medidas de saneamento básico. O presente trabalho tem como objetivo principal analisar, de forma consolidada, a partir da avaliação de risco, o sistema de abastecimento de água de Campina Grande. Desse modo, o trabalho utilizou a técnica de avaliação de risco FMEA, que gerou como resultados a definição dos riscos do sistema, sua classificação quanto à importância, como também identificou quais pontos no sistema apresentava maior violação dos padrões estabelecidos na Portaria MS/2914. Utilizou-se também a técnica de Árvore de falhas que permite a clara visualização, através de uma representação gráfica, das possíveis causas desses riscos, tornando-se um instrumento facilitador no gerenciamento do controle da qualidade de água. A ponderação dos riscos para classificação mostrou-se mais eficaz quando utilizada apenas CRL e turbidez, o que comprovou a importância dos indicadores sentinelas para a vigilância da qualidade de água.

PALAVRAS-CHAVE: Vigilância da qualidade da água. Indicadores sentinelas. Metodologia FMEA. Árvore de falhas.

ABSTRACT

The water supply system is a set of civil works, materials and equipment intended for the production and distribution of piped drinking water to populations. The quality of water in a water supply system may change during its journey in the distribution network, which demonstrates the vulnerability of wastewater. The search for methodologies that allow the early identification of possible health risks associated with the degradation of water quality for human consumption becomes one of the challenges in action planning for surveillance of water quality. The sentinel indicators are instruments that act early, effective and economical in identifying those changes that can cause waterborne diseases, can be prevented and control through sanitation measures. This work has as main objective to analyze, on a consolidated basis, from the risk assessment, the water supply system of Campina Grande. Thus, the study used the technique of FMEA risk assessment that generated results as the definition of system risks, their classification regarding the importance, as well as identify which points in the system had a greater violation of standards established in the Ordinance MS/2914. We also used the technique of fault tree which allows clear visualization through imaging, of the possible causes of such risks becoming a facilitator in managing the quality control of water. The risk weighting for classification was more effective when used only CRL and turbidity, which proved the importance of sentinel indicators for monitoring water quality.

Keywords: Surveillance of water quality. Sentinel indicators. FMEA methodology. Failure Tree.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Classificação da natureza dos parâmetros das portarias nacionais.....	20
Figura 2.2 -	Representações gráficas para a elaboração da árvore de falhas.....	28
Figura 2.3 -	Modelo de árvore de falhas.....	28
Figura 3.1 -	Mapa da cidade de Campina Grande.....	29
Figura 3.2 -	Vista da barragem Epitácio Pessoa (Boqueirão).....	32
Figura 3.3 -	Torre de captação da barragem Epitácio Pessoa.....	32
Figura 3.4 -	Estação elevatória de 800 de água tratada.....	33
Figura 3.5 -	Estação de Tratamento de Água (ETA) de Gravatá.....	34
Figura 3.6 -	Detalhe do reservatório R-9.....	35
Figura 3.7 -	Entrada do reservatório R-5.....	35
Figura 3.8 -	Manancial, estação de tratamento do SACG e algumas localidades atendidas.....	39
Figura 3.9 -	Unidades operacionais e localidades atendidas do SACG.....	38
Figura 3.10 -	Classificação para os indicadores CRL (padrão mínimo recomendado), CRL (padrão máximo recomendado), turbidez, pH (padrão mínimo) e pH (padrão máximo).....	42
Figura 3.11 -	Classificação para o indicador CRL (valor máximo permitido).....	43
Figura 4.1(a) -	Box plot para o indicador CRL em 2008.....	47
Figura 4.1(b) -	Box plot para o indicador turbidez em 2008.....	47
Figura 4.1(c) -	Box plot para o indicador pH em 2008.....	48
Figura 4.2(a) -	Box plot para o indicador CRL em 2009.....	49
Figura 4.2(b) -	Box plot para o indicador turbidez em 2009.....	49
Figura 4.2(c) -	Box plot para o indicador pH em 2009.....	50
Figura 4.3(a) -	Box plot para o indicador CRL em 2010.....	50
Figura 4.3(b) -	Box plot para o indicador turbidez em 2010.....	51
Figura 4.3(c) -	Box plot para o indicador pH em 2010.....	51
Figura 4.4(a) -	Box plot para o indicador CRL em 2011.....	52
Figura 4.4(b) -	Box plot para o indicador turbidez em 2011.....	53
Figura 4.4(c) -	Box plot para o indicador pH em 2011.....	53

Figura 4.5(a) - Box plot para o indicador CRL no ponto P8 em 2008.....	54
Figura 4.5(b) - Box plot para o indicador CRL no ponto P8 em 2010.....	54
Figura 4.5(c) - Box plot para o indicador CRL no ponto P8 em 2011.....	55
Figura 4.6 - Comportamento dos pontos com maior número de não conformidades.....	56
Figura 4.7 - Árvore de falhas do SACG, considerando indicadores sentinelas.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limites para turbidez após tratamento.....	24
Tabela 3.1 – Zonas de pressão do SACG.....	30
Tabela 3.2 – Reservatórios da zona urbana e distritos de Campina Grande.....	35
Tabela 3.3 – Localização dos pontos analisados.....	40
Tabela 3.4 – Quantidade de observações em cada ponto.....	41
Tabela 4.1 – Estatística descritiva e frequência de conformidades e não conformidades de indicadores sentinelas da qualidade da água.....	45
Tabela 4.2 – Resultado da classificação dos indicadores CRL (valores recomendados), turbidez e pH.....	57
Tabela 4.3 – Resultado da classificação dos indicadores CRL (máximo permitido), turbidez e pH.....	58
Tabela 4.4 – Formulário FMEA preenchido.....	60
Tabela 4.5 – Ponderação dos riscos individuais.....	61
Tabela 4.6 – Classificação do risco total considerando o valor recomendado.....	62
Tabela 4.7 – Classificação do risco total considerando o VMP.....	62
Tabela 4.8 – Ponderação do risco individual utilizando apenas indicadores sentinelas....	63
Tabela 4.9 – Classificação do risco total, considerando CRL (recomendado) e turbidez.....	63
Tabela 4.10 – Classificação do risco total, considerando CRL (VMP) e turbidez.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APHA – American Public Health Association
APR – Análise Preliminar de Riscos
AWWA – American Water Works Association
CAGEPA – Companhia de água e Esgotos da Paraíba
CRC – Cloro Residual Combinado
CRL – Cloro Residual Livre
DN – Diâmetro Nominal
EEAB - Estação elevatória de água bruta
ETA – Estação de tratamento de água
FMEA - Failure Modes and Effects Analysis
FTA – Failure Tree Analysis
HAZOP – Hazard and Operability Studies
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO – International Standardization Organization
MS – Ministério da Saúde
OMS – Organização Mundial da Saúde
pH – Potencial hidrogeniônico
PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PVC – Policloreto de vinila
SACG – Sistema de Abastecimento de Campina Grande
USEPA – United States Environmental Protection Agency
UT – Unidade de turbidez
VMP – Valor máximo permitido
WEF – Water Environment Federation

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO.....	16
2.1.1	Padrão de potabilidade.....	18
2.1.2	Controle e vigilância da qualidade de água.....	21
2.1.3	Plano de amostragem.....	22
2.1.4	Indicadores Sentinelas.....	22
2.1.4.1	Cloro Residual.....	23
2.1.4.2	Turbidez.....	24
2.1.4.3	pH.....	25
2.2.	ANÁLISE DE RISCO.....	25
2.2.1	Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA).....	26
2.2.2	Árvore de Falhas (FTA).....	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	29
3.2	SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE CAMPINA GRANDE (SACG).....	29
3.2.1	Manancial.....	31
3.2.2	Captação.....	32
3.2.3	Estações elevatórias.....	33
3.2.4	Tratamento.....	33
3.2.5	Reservatórios.....	34
3.2.6	Rede de distribuição.....	37
3.3	PONTOS AMOSTRADOS.....	40
3.4	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS.....	40
3.5	CLASSIFICAÇÃO DOS RISCOS.....	41
3.6	CÁLCULO DOS RISCOS.....	43
3.7	AVALIAÇÃO DE RISCO.....	44
3.7.1	Aplicação do FMEA.....	44

4	RESULTADOS.....	45
5	CONCLUSÃO.....	69
6	RECOMENDAÇÕES.....	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
	ANEXOS.....	74

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de abastecimento de água têm a finalidade de assegurar o bem estar às populações, visando prioritariamente superar os riscos impostos pela água. Para isso, as fases de concepção, projeto, implantação, operação e manutenção devem ser desenvolvidas com cuidado e eficiência.

A qualidade sanitária da água fornecida é um dos fatores mais importantes no gerenciamento de sistemas de abastecimento, pois a implantação traz como resultado uma rápida e sensível melhoria na saúde e nas condições de vida da população, através do controle e prevenção de doenças e da promoção de hábitos higiênicos.

Os órgãos responsáveis pelo controle e vigilância da qualidade da água devem atuar em sintonia, agindo de maneira frequente e contínua para a promoção da saúde humana, possibilitando formas de intervenção, assumindo caráter rotineiro e corretivo, durante o monitoramento. O caráter preventivo fica predominantemente para os envolvidos na vigilância, por ser a água dinâmica no tempo e no espaço, devendo a fiscalização ser realizada ao mesmo tempo em que a água é captada, distribuída e consumida.

Os indicadores sentinelas são, do ponto de vista sanitário, instrumentos de identificação eficaz e precoce de situações de risco relacionadas à água consumida. Esses indicadores asseguram representatividade e qualidade às informações produzidas. O cloro residual livre e a turbidez assumem o papel de indicadores sentinelas podendo indicar, precocemente e com baixos custos, as alterações que levam à degradação da qualidade microbiológica, que representa perigo à saúde e à segurança da população.

Uma água que contenha agentes patogênicos caracteriza um perigo e o seu fornecimento à população traz um risco que pode ser quantificado e expresso probabilisticamente. Isso reforça a necessidade de se ampliar a abordagem tradicional de controle da qualidade de água, como também de definir programas voltados à vigilância, embasados na Portaria MS 2914/2011, com o objetivo de garantir a proteção à saúde e ao bem-estar das populações.

A análise de risco é composta por três etapas: avaliação, gerenciamento e comunicação de risco. A avaliação de risco pode ser realizada utilizando várias técnicas como Análise de Modos e Efeitos de Falhas (Failure Mode and Effects Analysis – FMEA) e Análise de Árvore de Falhas. Neste trabalho, essas técnicas associadas aos indicadores sentinelas foram utilizadas promovendo uma visão geral do processo de degradação da água no sistema

de abastecimento de Campina Grande, resultando em contribuição para o controle e a vigilância da qualidade de água.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar de forma consolidada, a partir da avaliação de risco, o sistema de abastecimento de água de Campina Grande, definindo os pontos mais susceptíveis a não conformidade do padrão de potabilidade, através dos indicadores sentinelas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o sistema de abastecimento de água da cidade de Campina Grande, compreendendo a água tratada e a rede de distribuição, através dos indicadores cloro residual livre, turbidez e pH;
- Aplicar metodologias de avaliação de risco (FMEA e Árvores de Falhas) para caracterizar o sistema de abastecimento de água da cidade de Campina Grande quanto aos riscos da baixa qualidade de água;
- Associar não conformidades dos pontos às possíveis falhas de operação, de manutenção ou às características da infraestrutura da rede de distribuição de água;
- Identificar os pontos críticos do sistema de abastecimento de água da cidade de Campina Grande.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO

Na Antiguidade, o homem abandonou a vida nômade e adotou a agricultura como meio de subsistência. Logo, a caça deixou de ser sua principal fonte de sustento, o que intensificou a relação do homem com os cursos d'água devido à necessidade de cultivo das culturas e criação de rebanhos. Assim, foram sendo formadas as primeiras comunidades que se desenvolviam sempre às margens de grandes rios.

Durante muito tempo, a qualidade da água foi estimada por aspectos estéticos, as pessoas não relacionavam água impura com a ocorrência de doenças e não dispunham de tecnologias para conferir pureza à água, que para elas era determinada pela cor, odor e sabor.

Através da percepção de que a contaminação da água estava associada à presença de partículas, foram desenvolvidas técnicas de tratamento primitivas como a filtração e a decantação, que apesar de serem muito antigas ainda são utilizadas com frequência nas modernas Estações de Tratamento de Água (ETA).

Segundo Libânio (2008), foi através de uma epidemia de cólera que ocorreu em 1885 no Distrito de Broad Street em Londres, vitimando 521 pessoas, que o médico John Snow constatou empiricamente a contaminação por esgotos de um poço freático, mesmo a água apresentando cor, odor e sabor agradáveis.

Na década seguinte, Pasteur, com a Teoria Microbiana das Doenças, confirmou as suspeitas de Snow de que a água seria o veículo transmissor de diversas doenças, devido à presença de microrganismos. E foi a partir dos estudos de Snow e Pasteur que outros cientistas prosseguiram na identificação e classificação dos agentes patogênicos de doenças.

De acordo com Freitas & Freitas (2005), em função dessas descobertas científicas, no início do século 20, muitos sistemas de tratamento de água foram construídos nos Estados Unidos, empregando a filtração lenta como estratégia de controle da qualidade de água. Anos depois, também nos Estados Unidos, a cloração é empregada pela primeira vez no Estado de New Jersey, em 1908. Outros desinfetantes também foram utilizados no mesmo período, a exemplo do ozônio na Europa. As iniciativas de potabilização da água de consumo humano se deram antes do estabelecimento de normas e padrões de qualidade.

Atualmente, o aumento populacional e a constante interferência no meio ambiente vêm alterando a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Assim, as reservas de água

disponíveis são cada vez mais impactadas. As descargas de águas residuárias transformam os corpos d'água em veículo de transmissão de doenças, aumentando o risco de infecções como cólera, febres tifoide e paratifoide, febres e diversas doenças parasitárias.

Ceballos (2000) aborda as condições que favorecem a transmissão de microrganismos patogênicos relacionadas à deficiência no saneamento e às precárias condições socioeconômicas, entre elas: a oferta insuficiente de água potável, a contaminação dos corpos hídricos, redes coletoras de esgoto insuficientes, destino inadequado desses esgotos, acúmulo de resíduos em locais públicos ocasionando a proliferação de vetores dos patogênicos, assistência médica precária e a educação sanitária deficiente.

De acordo com o Atlas do Saneamento 2011, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a quase totalidade dos municípios brasileiros apresentava os serviços de abastecimento de água em pelo menos um distrito (99,4%). Dos 5.564 municípios existentes, em 2008, 33 deles não dispunham de rede geral, sendo 21 municípios localizados na Região Nordeste, dentre esses, 11 na Paraíba. Entretanto, cerca de 23% dos municípios brasileiros declararam conviver com o racionamento de água, onde em 41% deles o racionamento era constante, independente da época do ano.

A seca ou estiagem (66%) é o motivo predominante do racionamento no Brasil, entre outras causas investigadas como insuficiência de água no manancial, deficiência na produção, deficiência na distribuição e população flutuante em épocas de veraneio. O indicador do IBGE apresenta um padrão disperso por todo país, embora a maior concentração esteja nos municípios da Região Nordeste.

Dessa forma, é importante ressaltar que a qualidade da água, a sua quantidade e regularidade de fornecimento são fatores cruciais para o acometimento de doenças no homem. A quantidade insuficiente de água pode resultar em deficiência na higiene e mau acondicionamento da água, possibilitando a procriação de vetores e deterioração da qualidade da água reservada, como também a busca por fontes alternativas com elevados potenciais de risco pelo contato de pessoas com tais fontes ou pela baixa qualidade microbiológica.

Por isso, quando se trata de disponibilidade de água, se trata de água em quantidade suficiente e qualidade compatível com a existência de substâncias essenciais à vida e ausência de outras substâncias que causem efeitos deletérios aos usuários (BRASIL, 2006b).

2.1.1 Padrão de potabilidade

Conforme Brasil (2006a), água potável é a água para consumo humano cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde. Outrossim, padrão de potabilidade é o conjunto de valores permitidos como parâmetro da qualidade da água para consumo humano, conforme definido em Portaria do Ministério da Saúde.

As normas de potabilidade são instrumentos técnico-jurídicos elaborados pelas autoridades sanitárias, com o apoio de instituições técnico-científicas, a ser cumpridas pelos órgãos de vigilância do setor de saúde e pelas empresas públicas e privadas de abastecimento de água.

O primeiro padrão de potabilidade nacional, a Portaria 56 do Ministério da Saúde, surgiu em 1977, definindo limites máximos para características físicas, químicas e biológicas da água de consumo humano, tendo como principal balizador da qualidade da água, as recomendações do Serviço Norte-Americano de Saúde Pública (United States Public Health Service).

Em janeiro de 1990, o Ministério da Saúde publicou a Portaria 36, aumentando o número de parâmetros e tornando alguns limites mais restritivos, padrões esses que culminaram para a postergação da implementação dessa portaria para janeiro de 1992.

Entre as principais inovações introduzidas pela 36/90 estão: a definição de controle e vigilância da qualidade; a definição de sistema de abastecimento de água; e a inclusão e revisão de alguns parâmetros químicos e microbiológicos (FREITAS & FREITAS, 2005).

Posteriormente, em dezembro de 2000, após ampla revisão da Portaria 36, foi publicada a Portaria 1469, sendo efetivada em janeiro de 2003. Com a instituição da Secretaria de Vigilância em Saúde (SVS) do Ministério da Saúde, em junho de 2003, a SVS assumiu as atribuições do Centro Nacional de Epidemiologia, então foi revogada a Portaria 1.469/MS passando a vigorar a Portaria 518/MS, que reproduziu inteiramente o conteúdo da portaria anterior, mantendo também os mesmos valores permissíveis para os parâmetros existentes.

A principal modificação trazida pela portaria 1.469/MS foi a classificação dos tipos de sistemas de abastecimento de água em:

- Sistema coletivo – constitui uma instalação composta por um conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, destinados à produção e à distribuição canalizada de água potável para as populações, sob a responsabilidade do poder público, mesmo que administrada em regime de concessão ou permissão.
- Sistema ou solução alternativa – constitui de toda modalidade de abastecimento coletivo de água, distinta do sistema coletivo, incluindo, por exemplo, fontes, poços comunitários, distribuição por veículo transportador, instalações condominiais horizontais e verticais.

A portaria também estabeleceu deveres e responsabilidades aos órgãos de saúde, encarregados de realizar a vigilância, e às empresas de abastecimento, administradas sob o domínio público ou privado. Devendo ambos monitorar os parâmetros de qualidade, desde as áreas de proteção do corpo hídrico até o tratamento e distribuição, sob a perspectiva dos riscos à saúde pública associados à vulnerabilidade do abastecimento de água.

De acordo com Libânio (2008), da Portaria 36 para a 518 foram inseridos 22 parâmetros, além de alguns pesticidas, como o Atrazina e o Glifosato, sendo esse último o herbicida de comercialização mais intensa no país. Ademais, permaneceram alguns agrotóxicos organoclorados não mais comercializados no Brasil, mas que têm grande persistência no solo e, conseqüentemente, nas águas.

Em dezembro de 2011, foi publicada pelo Ministério da Saúde, a Portaria nº 2.914, ora que está em vigor. Essa quinta versão da norma de qualidade de água foi resultado de um amplo processo de discussão da Portaria 518/MS que envolveu o Ministério da Saúde, as universidades e as empresas de saneamento.

Para fins da Portaria 2914/2011 são adotadas as definições:

- I. Água para consumo humano: água potável destinada à ingestão, preparação e produção de alimentos e à higiene pessoal, independente da sua origem;
- II. Água potável: água que atenda ao padrão de potabilidade estabelecido nesta Portaria e que não ofereça riscos à saúde;
- III. Água tratada: água submetida a processos físicos, químicos ou combinação destes, visando atender ao padrão de potabilidade;

O padrão de potabilidade definido pela Portaria MS 2914/2011 é composto por: (i) padrão microbiológico; (ii) padrão de turbidez para a água pós-filtração ou pré-desinfecção; (iii) padrão para substâncias químicas (inorgânicas, orgânicas, agrotóxicos, desinfetantes e produtos secundários da desinfecção) que representam risco à saúde; (iv) padrão de

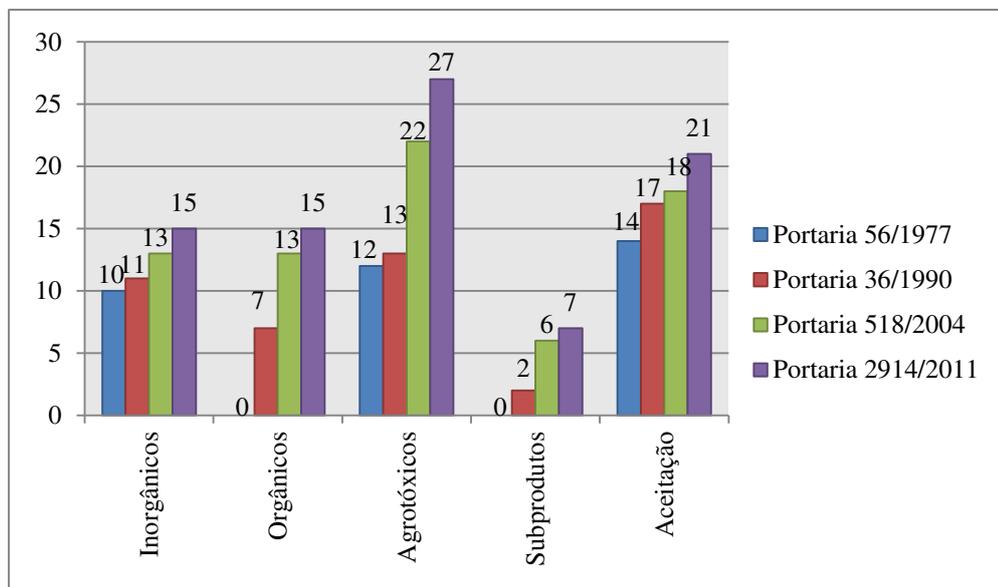
radioatividade; (v) padrão de cianotoxinas da água para consumo humano; (vi) padrão organoléptico de potabilidade.

As atividades de vigilância e controle da qualidade da água, no objetivo de avaliar o cumprimento dos padrões exigidos, devem seguir metodologias analíticas descritas em normas nacionais e internacionais recomendadas na Portaria MS 2914/2011:

- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater de autoria das instituições American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) e Water Environment Federation (WEF);
- United States Environmental Protection Agency (USEPA);
- Normas publicadas pela International Standardization Organization (ISO); e
- Metodologias propostas pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

Com a evolução das portarias de potabilidade, os parâmetros tornam-se mais restritivos à medida que os conhecimentos técnicos e científicos avançam. Na Figura 2.1, é feita a classificação dos tipos de parâmetros analisados em cada portaria mencionada.

Figura 2.1 – Classificação da natureza dos parâmetros das portarias nacionais



Fonte: Adaptada de Libânio (2008)

2.1.2 Controle e vigilância da qualidade da água

Segundo Brasil (2006b), a concepção, o projeto, a implantação, a operação e a manutenção são etapas fundamentais de um sistema de abastecimento de água, mas insuficientes para assegurar que o sistema não ofereça risco à saúde humana. Podem vir a ocorrer descargas acidentais de contaminantes ou lançamento clandestino de efluentes no manancial, pressão negativa na tubulação (adutora ou rede de distribuição), rompimento de redes e adutoras, problemas operacionais na estação de tratamento (coagulação incorreta, produto químico adulterado, lavagem ineficiente de filtros, comprometimento do leito filtrante, danos em equipamentos de manuseio de produtos químicos), ou penetração de contaminantes diversos nos reservatórios públicos que resultariam em distribuição de água não potável.

Por isso, faz-se necessária a administração de procedimentos corretos de controle e vigilância de qualidade do produto, neste caso, a água distribuída e consumida. A amostragem e análises físico-químicas e microbiológicas da água devem ser realizadas com frequência adequada e nos pontos mais vulneráveis do sistema permitindo identificar, de forma probabilística, as possíveis falhas a fim de corrigi-las através de sua adequação a um conjunto de parâmetros de qualidade expressos na legislação da água.

A Portaria MS 2914/2011 define, entre seus objetivos, as responsabilidades e os procedimentos adotados para o controle e a vigilância da qualidade da água para consumo humano, estabelecendo claramente a diferença entre essas ações:

- “Controle da qualidade da água para consumo humano é o conjunto de atividades exercidas regularmente pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água, destinado a verificar se a água fornecida à população é potável, de forma a assegurar a manutenção desta condição;”
- “Vigilância da qualidade de água para consumo humano é o conjunto de ações adotadas regularmente pela autoridade de saúde pública para verificar o atendimento a esta Portaria, considerados os aspectos socioambientais e a realidade local, para avaliar se a água consumida pela população apresenta risco à saúde humana.”

2.1.3 Plano de amostragem

Segundo a *Diretriz nacional do plano de amostragem da vigilância em saúde ambiental* relacionada à qualidade da água para consumo humano (BRASIL, 2006c), o plano de amostragem deve abranger: os pontos de coleta, o número e a frequência das amostras, a definição de quais parâmetros são analisados e quais os laboratórios responsáveis pela coleta e análise laboratorial. A escolha dos pontos amostrados é orientada pela análise do cadastro e inspeções, pela representatividade espacial e temporal, pela densidade populacional (locais com grande afluência de público, com população vulnerável ou exposta a contaminação), bem como zonas de intermitência de abastecimento ou de baixa pressão no sistema de distribuição.

Deve ser selecionado um conjunto de pontos compostos por pontos críticos e não críticos buscando a representatividade pela distribuição geográfica desses pontos e identificação das situações de risco. Pontos em situação de risco são reconhecidos como aqueles mais vulneráveis, que abasteçam maior número de pessoas ou que abasteçam pessoas susceptíveis, como em hospitais, creches, escolas, entre outros. Soluções alternativas coletivas desprovidas de rede de distribuição a exemplo de poços comunitários, distribuição por veículo transportador, instalações condominiais, horizontal e vertical, apresentam indícios de risco.

A Portaria vigente enfatiza que, na seleção dos locais de coleta, devem ser priorizadas as pontas de rede e locais que alberguem grupos populacionais de risco à saúde humana.

2.1.4 Indicadores sentinelas

Os indicadores são capazes de descrever a qualidade da água, analisando suas características físicas, químicas e biológicas. Esses indicadores são selecionados de acordo com as características do sistema de distribuição de água, de forma que sejam eficazes para indicar o risco à saúde da população.

De acordo com a *Diretriz nacional do plano de amostragem da vigilância em saúde ambiental* relacionada à qualidade da água para consumo humano (BRASIL, 2006c), os indicadores sentinelas, do ponto de vista sanitário, são instrumentos de identificação precoce de situações de risco em relação à água consumida pela população que podem ocasionar em doenças de transmissão hídrica, passíveis de prevenção e controle, através de medidas de saneamento básico. O termo sentinela é utilizado em analogia às chamadas fontes sentinelas e aos Sistemas de Vigilância Sentinela muito usados em epidemiologia. Quando bem

selecionados, os indicadores sentinelas asseguram representatividade e qualidade às informações produzidas, mesmo que não se pretenda conhecer o universo das ocorrências.

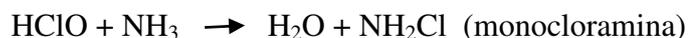
O cloro residual livre e a turbidez assumem o papel de indicadores sentinelas podendo indicar precocemente alterações que levam à degradação da qualidade microbiológica, representando perigo à saúde e à segurança da população.

2.1.4.1 Cloro Residual

No Brasil, o cloro molecular é o principal agente desinfetante da água de consumo humano, por ser o desinfetante que resume as melhores características de custo-benefício. De acordo com Lenzi (2009), a escolha do cloro como desinfetante apresenta os seguintes pontos positivos: fácil obtenção do cloro no estado gasoso, liquefeito ou sólido; baixo custo e facilidade de manuseio; boa solubilidade em água; residual de fácil determinação; eficiência por destruir a maioria dos organismos patogênicos.

O cloro quando adicionado à água limpa forma o ácido hipocloroso o qual coexiste com íons hipoclorito e hidrogênio. As concentrações relativas de ácido hipocloroso e hipoclorito dependem do pH e da temperatura, sendo sua soma denominada cloro residual livre (CRL).

O ácido hipocloroso reage com o nitrogênio amoniacal resultando no cloro residual combinado (CRC), que tem poder desinfetante (monocloramina e dicloramina) reduzido comparado ao do CRL e sua formação e posterior oxidação (cloração de deflexão) são responsáveis por significativa demanda de cloro (SILVA; OLIVEIRA, 2001).



De acordo com a portaria MS 2914/2011 é obrigatória a manutenção de, no mínimo, 0,2 mg/L de cloro residual livre em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede). Além disso, a Portaria recomenda que o teor máximo de cloro residual livre em qualquer ponto do sistema de abastecimento seja de 2,0 mg/L. Sendo 5,0 mg/L, o valor máximo permitido (VMP) de cloro residual livre.

2.1.4.2 Turbidez

A turbidez é um dos principais indicadores de qualidade de afluentes e efluentes de quase todas as estações de tratamento de água sendo de determinação rápida e simples. Além disso, é um indicador capaz de descrever a qualidade da água e indicar os efeitos que essa qualidade exerce sobre as operações unitárias de tratamento.

Segundo Brasil (2006b), diversos estudos já comprovaram uma menor eficiência dos compostos de cloro na inativação dos microrganismos, quando a turbidez se eleva a partir de 1,0 UT, pois promove um efeito escudo sobre os mesmos, protegendo-os da ação do desinfetante. Além disso, o processo de filtração também se torna mais difícil e oneroso em águas muito turvas.

A turbidez está relacionada à presença de materiais em suspensão como argila, silte, material orgânico e inorgânico, plâncton e outros microrganismos, sendo uma propriedade ótica que causa a dispersão e absorção da luz, ao invés de transmiti-la em linha reta. A Portaria MS 2914/2011, determina limites para a turbidez pós-filtração ou pré-desinfecção (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Limites para turbidez após tratamento

Tratamento de água	
Desinfecção (para águas subterrâneas)	1,0 UT em 95% das amostras
Filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta)	0,5 UT em 95% das amostras
Filtração lenta	1,0 UT em 95% das amostras

Fonte: Brasil (2011).

A Portaria estabelece também metas progressivas anuais, ao longo de quatro anos, para o cumprimento dos padrões de turbidez.

Para qualquer amostra pontual, o limite máximo deve ser de 5,0 UT, em toda extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede).

2.1.4.3 pH

O pH representa a concentração de íons hidrogênio (H^+), em escala antilogarítmica (Equação 2.1), indicando a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade da água (VON SPERLING, 2005).

$$pH = -\log[H^+] \quad \text{Eq. 2.1}$$

Quando se trata de sistema de abastecimento de água, o pH intervém na coagulação química visto que a ação de um determinado coagulante se torna mais efetiva em um pH adequado. Intervém também no controle da corrosão, no abrandamento e na desinfecção com cloro devido à dissociação do ácido hipocloroso ($HClO$) e conseqüentemente formação do íon hipoclorito (OCl^-). Uma vez que o ácido hipocloroso é um desinfetante bem mais eficiente e sua dissociação acelera-se com a elevação do pH.

Segundo Lenzi (2009), a correção do pH em águas tratadas consiste, geralmente, em aplicar hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), removendo o gás carbônico livre (CO_2) que provoca acidez na água com o objetivo de prevenir corrosões nas tubulações da rede de abastecimento. Quando as águas são muito alcalinas, o pH é corrigido com a adição de ácido sulfúrico (H_2SO_4), pois o pH sendo bastante elevado possibilita a formação de incrustações nas tubulações devido à precipitação de sais contidos na água.

A Portaria MS 2914/2011 recomenda que o pH seja mantido na faixa de 6,0 a 9,5 em toda a rede de distribuição.

2.2 ANÁLISE DE RISCO

Ao estudar análise de risco é preciso esclarecer a diferença entre perigo e risco. O perigo seria um efeito adverso inerente a uma determinada situação. Risco é a probabilidade de um evento indesejável acontecer, ou seja, é a quantificação do perigo com base na frequência e magnitude. Por exemplo, uma água para consumo humano que contenha agentes patogênicos seria um perigo, enquanto seu fornecimento à população traz um risco, que pode ser quantificado e expresso em termos de probabilidade. (BRASIL, 2006a).

A avaliação de risco é um processo orientado para a quantificação da perda máxima provável que dele possa decorrer, ou seja, da quantificação da probabilidade de ocorrência desse risco e de suas conseqüências e/ou gravidades (CARMO et al., 2008).

Existem diversas técnicas de avaliação de risco, entre elas: Análise de Perigos e Operabilidade (Hazard and Operability Studies - HAZOP), Estudo de Caso, Análise Preliminar de Riscos (APR), Análise de Árvore de Eventos, como também Análise de Modos e Efeitos de Falhas (Failure Mode and Effects Analysis - FMEA) e Análise de Árvore de Falhas.

2.2.1 Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)

Segundo Nascimento e Oliveira (2011), a Análise de Modos e Efeitos de Falhas (Failure Mode and Effects Analysis - FMEA) é um método sistemático e detalhado para avaliar o que causa e quais os efeitos de falhas num processo. Trata-se de uma análise detalhada podendo ser qualitativa ou quantitativa.

Inicialmente é realizada a análise de forma qualitativa na revisão dos modos de falhas do componente e na determinação dos componentes cujas falhas têm efeito crítico na operação do sistema. Em seguida, o processo pode ser analisado quantitativamente para estabelecer a confiabilidade ou probabilidade de falha do sistema, através do cálculo de probabilidades de falha do sistema a partir das falhas individuais de seus componentes, determinando como poderiam ser reduzidas estas probabilidades.

O FMEA segue as seguintes etapas:

- Criação de um grupo multidisciplinar com, no máximo, seis especialistas em diferentes áreas;
- Discussão dos riscos de um determinado processo;
- Preenchimento do formulário contendo os efeitos, as causas, as medidas mitigadoras e a quantificação desse risco;
- Geração de um resultado denominado risco total do processo, usando os critérios de severidade, ocorrência, detecção e abrangência para a quantificação.

Os critérios para quantificação do risco total são definidos pelos seguintes níveis: a severidade é quão problemática o risco pode ser caso ele ocorra; a ocorrência é a frequência de acontecimento desse risco no processo atual; a detecção é a dificuldade em detectar o risco preventivamente e a abrangência é o quanto esse risco se difunde em função da área (OGATA, 2011). Além dos escores atribuídos para estes níveis, o formulário deve conter os

tipos do perigo, se real ou potencial; as causas destes perigos; os efeitos gerados, caso os mesmos ocorram; como também as possíveis medidas mitigadoras.

2.2.2 Árvore de falhas (FTA)

O objetivo da Árvore de Falhas (Failure Tree Analysis - FTA) é determinar quais possíveis combinações de falhas de componentes de um sistema ou erros humanos poderiam acarretar a ocorrência de um evento indesejado e quais destas combinações são as que mais contribuem para a ocorrência deste evento.

De acordo com Carneiro (2011), Árvore de Falhas é uma técnica de identificação de perigos e avaliação de risco que parte de um evento indesejável e pré-definido (evento topo) e estabelece combinações de falhas e condições que poderiam causar esse evento. Consiste em uma técnica lógica e dedutiva que se utiliza de uma representação gráfica da interação de todas as possíveis falhas com o evento topo. A construção da árvore segue um processo inverso, em termos cronológicos, pois partindo do evento topo (o resultado final) buscam-se as causas do evento.

As etapas do método FTA são:

- Reconhecimento dos acontecimentos indesejáveis;
- Divisão dos acontecimentos em grupos com origens semelhantes;
- Identificação do evento topo;
- Construção dos níveis subsequentes ou ramos da árvore de falhas;
- Determinação das combinações mínimas de falhas para que se origine o evento topo, por eliminação dos eventos repetidos, aplicando-se as propriedades da álgebra booleana;
- Quantificação da probabilidade do acidente;
- Recomendações de medidas preventivas.

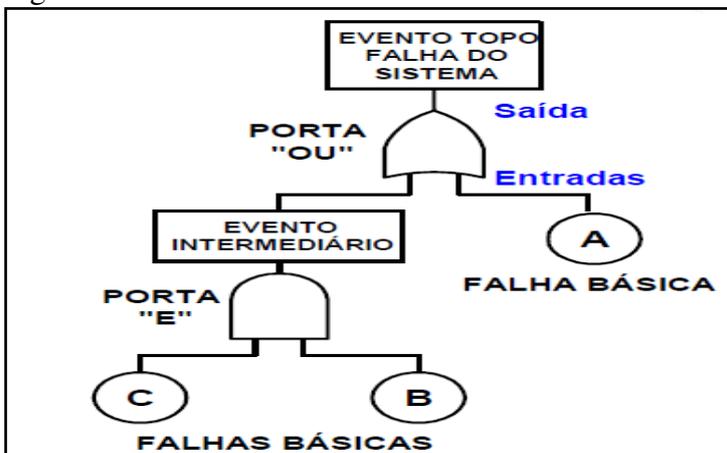
As sequências dos eventos na representação gráfica são construídas com o auxílio de comportas lógicas (E - OU), os retângulos representam o evento topo ou os eventos intermediários, tendo o evento descrito dentro da figura. Enquanto as falhas primárias são representadas por círculos e permitem estimar a probabilidade de ocorrência do evento topo. A Figura 2.2 ilustra as principais representações utilizadas na elaboração da árvore e a Figura 2.3 ilustra um modelo de árvore de falhas.

Figura 2.2 – Representações gráficas para a elaboração da árvore de falhas

	Módulo ou comporta "E"
	Módulo ou comporta "OU"
	Módulo ou comporta de inibição. Permite aplicar uma condição ou restrição à sequência
	Identificação de um evento particular, topo ou contribuinte
	Falha primária de um ramo ou série. Evento básico
	Normalmente um evento que sempre ocorre, a menos que ocorra falha
	Evento não desenvolvido. Falta de informação ou de consequência suficiente.
	Indica ou estipula restrições
	Símbolo de conexão a outra parte da árvore

Fonte: Nascimento e Oliveira (2011).

Figura 2.3 – Modelo de árvore de falhas



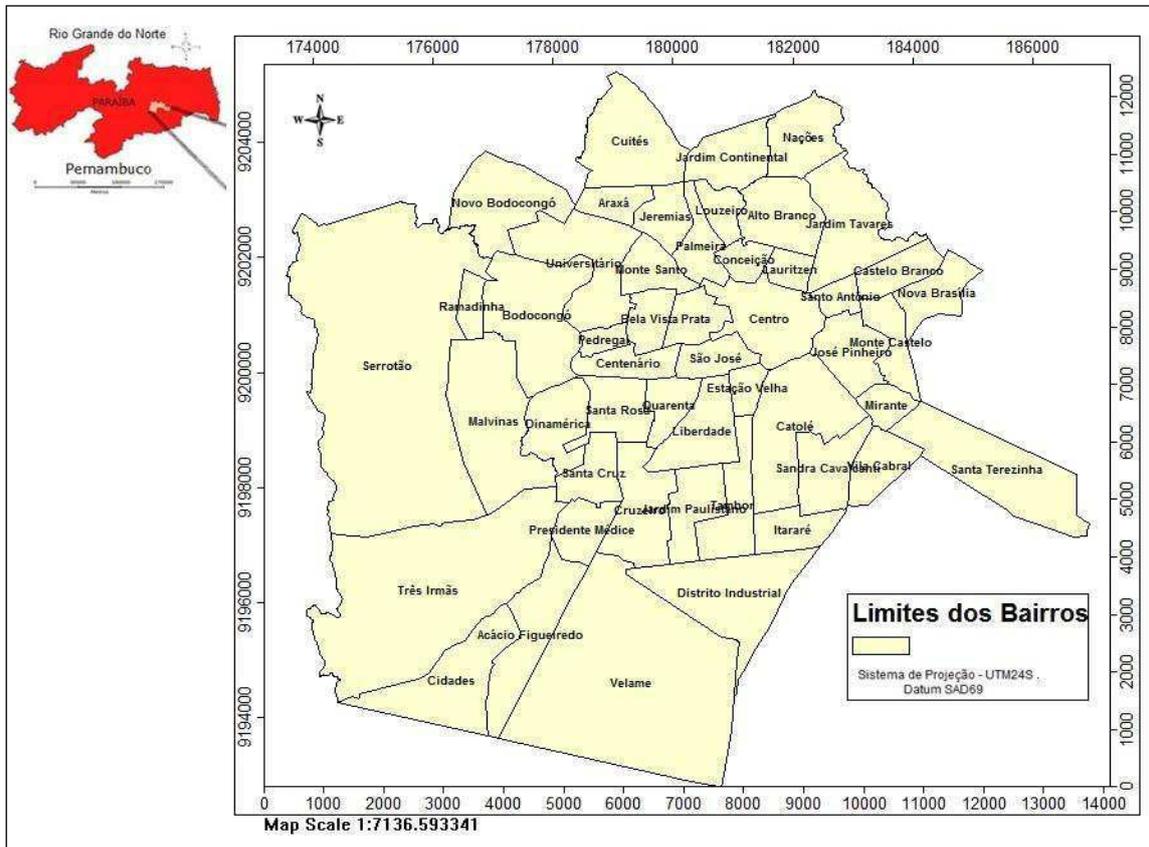
Fonte: Sucena (2008)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho foi desenvolvido na cidade de Campina Grande (Figura 3.1), cujas coordenadas geográficas são 7° 13' 50" Sul e 35° 52' 52" Oeste, localizando-se a 120 km da capital do estado da Paraíba, João Pessoa. De acordo com IBGE (2010), a cidade possui uma área de 594 km² e uma população de 385.213 habitantes.

Figura 3.1 – Mapa da cidade de Campina Grande



Fonte: Autor (2012)

3.2 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE CAMPINA GRANDE (SACG)

O sistema de abastecimento de água é uma obra de engenharia com a finalidade de assegurar o conforto às populações, visando prioritariamente superar os riscos impostos pela água. Para que isso ocorra, as fases de concepção, projeto, implantação, operação e manutenção devem ser desenvolvidas com cuidado e eficiência.

O Ministério da Saúde estabelece que sistema de abastecimento de água para consumo humano é a instalação composta por conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, destinados à produção e à distribuição canalizada de água potável para populações, sob a responsabilidade do poder público, mesmo que administrada em regime de concessão ou permissão (BRASIL, 2006d).

Segundo Meneses (2011), o Sistema de Abastecimento de Campina Grande (SACG) é operado pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA) e, segundo Meneses (2011), atende a Campina Grande e outras oito cidades: Queimadas, Barra de Santana e Caturité, que são atendidas a partir da estação de tratamento com adutoras próprias e Alagoa Nova, Lagoa Seca, São Sebastião de Lagoa de Roça, Matinhas e Pocinhos que são abastecidas a partir da rede de distribuição de Campina Grande.

Em razão da grande variação de altitude de Campina Grande, a rede de distribuição foi dividida em quatro zonas de pressão denominadas A, B, C e D, que foram expandidas ao longo tempo. Em Campina Grande, o sistema abastece 145.378 economias (residenciais, comerciais, industriais e públicas) distribuídas em quatro zonas de pressão. A Tabela 3.1 apresenta as zonas de pressão do sistema, os bairros que atendem e o número de economias.

Tabela 3.1 – Zonas de pressão do SACG

ZONA	PRINCIPAIS BAIRROS	Nº DE ECONOMIAS
A	Quarenta, Liberdade, Cruzeiro, Santa Rosa, Jardim Paulistano, Catolé, Mirante, José Pinheiro, Malvinas, Presidente Médici e Distrito Industrial.	75.345
B e C	Centro, Santo Antônio, São José, Prata, Centenário, Alto Branco, Juracy Palhano, Nações, Cuités, Palmeira, Prata, Monte Santo, Conjunto dos Professores, o distrito de Jenipapo e cidades de Lagoa Seca, Alagoa Nova, São Sebastião de lagoa de Roça e Matinhas.	50.445
D	Jeremias, Bodocongó, São Januário, Severino Cabral, Lagoa de Dentro, São José da Mata, zona rural de São José da Mata e a cidade de Pocinhos.	16.904
	TOTAL	130.839

Fonte: MENESES (2011).

Os sistemas de abastecimento compreendem as seguintes etapas: captação, onde a água bruta encontrada nos mananciais é coletada; adução, etapa em que o montante de água é transportado, podendo ser da captação para o tratamento ou do tratamento para reservação; tratamento que compreende diversos processos químicos e físicos que transformam a água

bruta em água potável; reservação onde o montante de água é armazenado para uma fração do consumo diário da população, acrescida da reserva para combate a incêndios; e distribuição, parte final do sistema onde a água é distribuída do reservatório para os domicílios, através de redes de distribuição que normalmente se utilizam da gravidade.

3.2.1 Manancial

Manancial é toda fonte de água destinada ao abastecimento, seja ele doméstico, industrial, comercial ou até mesmo para outros usos. Os mananciais são classificados em superficial que incluem córregos, rios, lagos e ribeirões, ou seja, todo aquele que escoar na superfície e/ou se deposita nas depressões do terreno. Os mananciais subterrâneos se encontram completamente abaixo da superfície terrestre, compreendendo os lençóis freáticos e profundos; e as águas meteóricas que contribuem para formação dos mananciais, encontradas na atmosfera e que precipita na forma de chuva, garoa, orvalho, geada, saraiva, neve ou granizo.

Para a escolha do manancial abastecedor são seguidos critérios de qualidade da fonte com base na avaliação de componentes orgânicos, inorgânicos e biológicos. Também são considerados critérios de quantidade com base na vazão mínima do manancial e critérios econômicos. O sucesso das demais unidades do sistema depende da escolha criteriosa do manancial.

O manancial que abastece o SACG é o açude Epitácio Pessoa (Figura 3.2), também chamado de açude Boqueirão, localizado a 42 km de Campina Grande, no município de Boqueirão, cuja capacidade máxima atual é de 411.686.287 m³, com um volume de 242.432.350 m³ (AESAs, 2013), o que se refere a 58,9% de sua capacidade. O gerenciamento do açude é de responsabilidade do Departamento Nacional de Obras Contra a Secas (DNOCS).

Figura 3.2 – Vista da barragem Epitácio Pessoa (Boqueirão)



Fonte: Albuquerque (2007).

3.2.2 Captação

A captação é realizada através da descarga de fundo de barragem (Figura 3.3). No interior da barragem, localiza-se uma tubulação de aço com 1.500 mm de diâmetro que se bifurca em duas tubulações uma de 900 mm e outra de 1.100 mm por onde a água é conduzida até a estação elevatória de água bruta (EEAB).

A estação elevatória compreende duas elevatórias de água bruta compostas, cada uma delas, por quatro conjuntos de moto-bomba (um conjunto reserva), para uma adutora de DN 900 mm e para uma adutora de DN 800 mm. Cada adutora tem um comprimento de, aproximadamente, 22 km, funcionando de 1 a 3 conjuntos de moto-bomba, dependendo da demanda, para cada adutora transportar a água até a Estação de Tratamento de Água de Gravatá.

Figura 3.3 – Torre de captação na barragem Epitácio Pessoa.



Fonte: Albuquerque (2007).

3.2.3 Estações elevatórias

As estações elevatórias existem para recalque de água bruta como também para recalque de água tratada. Segundo Albuquerque (2007), no sistema de distribuição de Campina Grande, as adutoras de 900 mm e 800 mm veiculam água bruta, com uma vazão média de 1,3 m³/s.

A água depois de tratada é transportada por meio de três linhas adutoras de diâmetros distintos: 500, 700 e 800 mm (Figura 3.4). As três adutoras transportam a água para o reservatório R-9. Porém, na adutora de 700 mm existe uma derivação que transporta água para o R-5 antes da chegada ao R-9.

Figura 3.4- Estação elevatória de 800 mm de água tratada em Gravatá.



Fonte: Albuquerque (2007)

3.2.4 Tratamento

O tratamento tem como objetivo remover partículas, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias deletérias à saúde que possam estar presentes na água bruta, adequando-a ao padrão de potabilidade vigente (Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde).

Na ETA de Gravatá (Figura 3.5) possui capacidade para tratar 1500 L/s de acordo com Meneses (2011), a tecnologia utilizada envolve, sequencialmente, coagulação, floculação, decantação, filtração descendente e desinfecção com cloro. O processo químico inicia-se com

a adição de sulfato de alumínio e cal, na mistura rápida. Após, a coagulação na calha Parshall, a água passa por floculadores mecânicos de eixos verticais tipo paletas. A decantação é levada a efeito em decantadores de fluxo horizontal. Em seguida, ocorre a filtração descendente (filtros de gravidade) e a desinfecção no tanque de contato de cloro.

Figura 3.5 – Estação de Tratamento de Água (ETA) de Gravatá.



Fonte: Albuquerque (2007).

3.2.5 Reservatórios

Os reservatórios de distribuição de água são projetados para funcionar como reguladores da distribuição, mantendo a pressão na rede de distribuição independente da variação horária e diária do consumo de água, assegurando também uma reserva de água para combater incêndios e atender as condições de emergência como acidentes, reparos, interrupções da adução e outros (ALBUQUERQUE, 2007).

De acordo com Meneses (2011), os dois principais reservatórios do sistema de abastecimento de Campina Grande são os denominados R9 (Figura 3.6) e o R5 (Figura 3.7). Algumas unidades de reservação foram desativadas devido à ampliação do sistema, a exemplo dos reservatórios denominados R8 e R16 que foram desativados após a construção e funcionamento do R9. E outros reservatórios estão inativos, como o R31, localizado no bairro

da Glória abastecido diretamente dos reservatórios R4 e R5. A Tabela 3.2 apresenta as características principais do sistema de reservação de Campina Grande.

Figura 3.6 – Detalhe do reservatório R-9



Fonte: Leal (2012)

Figura 3.7 – Entrada do reservatório R-5



Fonte: Leal (2012)

Tabela 3.2 - Reservatórios da zona urbana e distritos de Campina Grande

Reservatório	Capacidade (m ₃)	Situação operacional	Nível da água		Tipo	Zona	Locais atendidos
			Máximo	Mínimo			
R0-ETA Gravatá		Ativado			apoiado		Poço de sucção
RLF (ETA-lavagem dos filtros)					elevado		
R1-Alto Branco	3.080	Ativado	563,0	560,0	semi-enterrado	B	R7
R2-Centro	2.290	Ativado	554,8	552,0	semi-enterrado	B	São José
R3-Monte Santo	500	Desativado	575,2	572,0	semi-enterrado	C	
R4-Palmeiras	10.000	Ativado	607,3	602,3	apoiado	C	Diversos
R5-Prata	8.000	Ativado	567	563	semi-enterrado	B e C	Diversos
R6-Dist. Industrial	400	Ativado	530,5	524,7	elevado	A	Dist.Industrial de CG
R6T- Dist. Industrial	2.000	Desativado	501,5	498,5	semi-enterrado	A	
R7-B. das Nações	200	Ativado	616,4	612,6	elevado	C	B. das Nações
R8- Presidente Médici	200	Desativado	514,7	509,6	elevado	A	
R9- Santa Rosa	29.000	Ativado	554	548,5	apoiado	A e D	Diversos
R10- Bodocongó	2.000	Ativado	571	566	apoiado	D	Bodocongó, Araxá e Ramadinha I

Continua

Tabela 3.2 - Reservatórios da zona urbana e distritos de Campina Grande (continuação)

Reservatório	Capacidade (m ₃)	Situação Operacional	Nível da água		Tipo	Zona	Locais atendidos
			Máximo	Mínimo			
R11- Bodocongó	250	Ativado	616,5	613	elevado	D	Granjas
R12-São Januário	200	Ativado	612,8	608,8	apoiado		Ramadinha II
R13- São Januário	250	Ativado	665	662	elevado	D	R14 e São Januário
R14- São João da Mata	300	Ativado	704,5	669	elevado	D	São José da Mata e Pocinhos
R15-Mirante	350	Ativado	517,5	513	apoiado	A	Mirante e Distrito de Santa Terezinha
R16-Malvinas	500	Desativado	554	549	elevado	A	
R17-Distrito Industrial Queimadas	600	Ativado	535	530	elevado	A	Distrito Industrial de Queimadas
R18-Conjunto Mutirão	200	Ativado	620	616	elevado	A	Mutirão
R19-Alça Sudoeste	250	Ativado	512	508	elevado	A	Distrito Industrial do Ligeiro
R20-Galante	150	Ativado	417	414	elevado	A	Distrito de Galante
R21-Alça Sudoeste	150	Inativo			elevado	A	
R22- Pocinhos ⁽¹⁾	200	Ativado			elevado	D	Pocinhos e Bela Vista
R23-Pocinhos ⁽¹⁾	250	Ativado			elevado	D	Pocinhos
R28-Nenzinha Cunha Lima	300	Inativo			apoiado	A	Reserva incêndio
R28- Nenzinha Cunha Lima	200	Ativado			elevado	A	Conjunto Nenzinha Cunha Lima
R29- Cuités	300	Ativado		677	elevado	C	Cuités
R30- Jardim Continental		a executar				C	Jardim Continental
R31-Conjunto Glória		Inativo			elevado	B	Conjunto Glória
R32- Distrito de Jenipapo	150	Ativado	705,5	701,1	elevado	C	Distrito de Jenipapo
R35- Residencial Privê		Ativado			elevado	C	Condomínio Residencial Privê
R36- Lagoa Seca ⁽¹⁾	150	Ativado			elevado	C	Cidade de Lagoa Seca
R37- Lagoa Seca ⁽¹⁾	36	Ativado			elevado	C	Sistema Brejo

Continua

Tabela 3.2 - Reservatórios da zona urbana e distritos de Campina Grande (continuação)

Reservatório	Capacidade (m ₃)	Situação Operacional	Nível da água		Tipo	Zona	Locais atendidos
			Máximo	Mínimo			
R38-Lagoa Seca ⁽¹⁾	500	ativado			apoiado	C	Sítio de Imbaúba e Brejo
R39- São Sebastião de Lagoa de Roça ⁽¹⁾	150	ativado			elevado	C	Cidade de S. Sebastião de Lagoa de Roça
R40- Alagoa Nova ⁽¹⁾	220	ativado			elevado	C	Cidade de Alagoa Nova
R41- Matinhas ⁽¹⁾	50	ativado			elevado	C	Cidade de Matinhas

Notas: (1) Reservatórios abastecidos a partir da rede de distribuição de Campina Grande.

Fonte: Meneses (2011)

3.2.6 Rede de distribuição

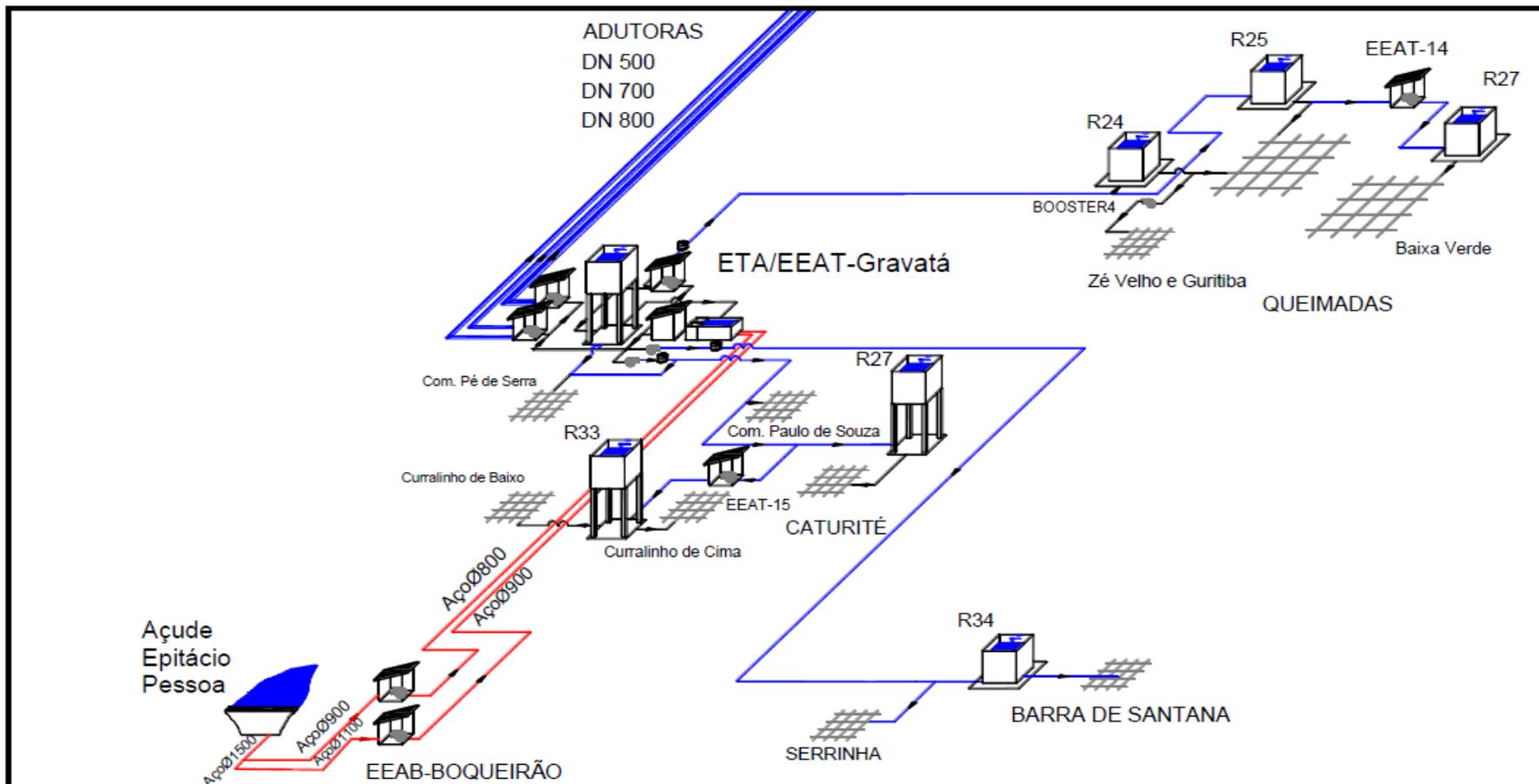
A rede de distribuição é constituída por tubulações e órgãos acessórios, destinados a atender a necessidade por água potável de forma contínua, em quantidade, qualidade e pressão adequadas. Requer uma constante atualização cadastral, visto que o processo de modificação das suas unidades é dinâmico devido à expansão natural do sistema.

Conforme Albuquerque (2007), a rede de distribuição do SACG tem extensão de 900 km de diversos tipos como ramificadas, malhadas e mistas com pressões variando entre a dinâmica mínima de 10 mca, e a máxima estática de 50 mca. Esta rede distribui 3.106.000 metros cúbicos mês de água (Divisão de Controle Operacional da CAGEPA). Atendendo 83500 ligações domiciliares, com 93% de medição, correspondente a uma população de 450.000 habitantes que se refere à cidade de Campina Grande e dos demais municípios abastecidos pela rede, conforme o cadastro comercial da CAGEPA.

Os trechos mais antigos existentes na tubulação da rede de distribuição do SACG são de cimento amianto e ferro fundido e os mais recentes são de policloreto de vinila (PVC). O comprimento total da rede é de 1.350.821,57 metros (MENESES, 2011).

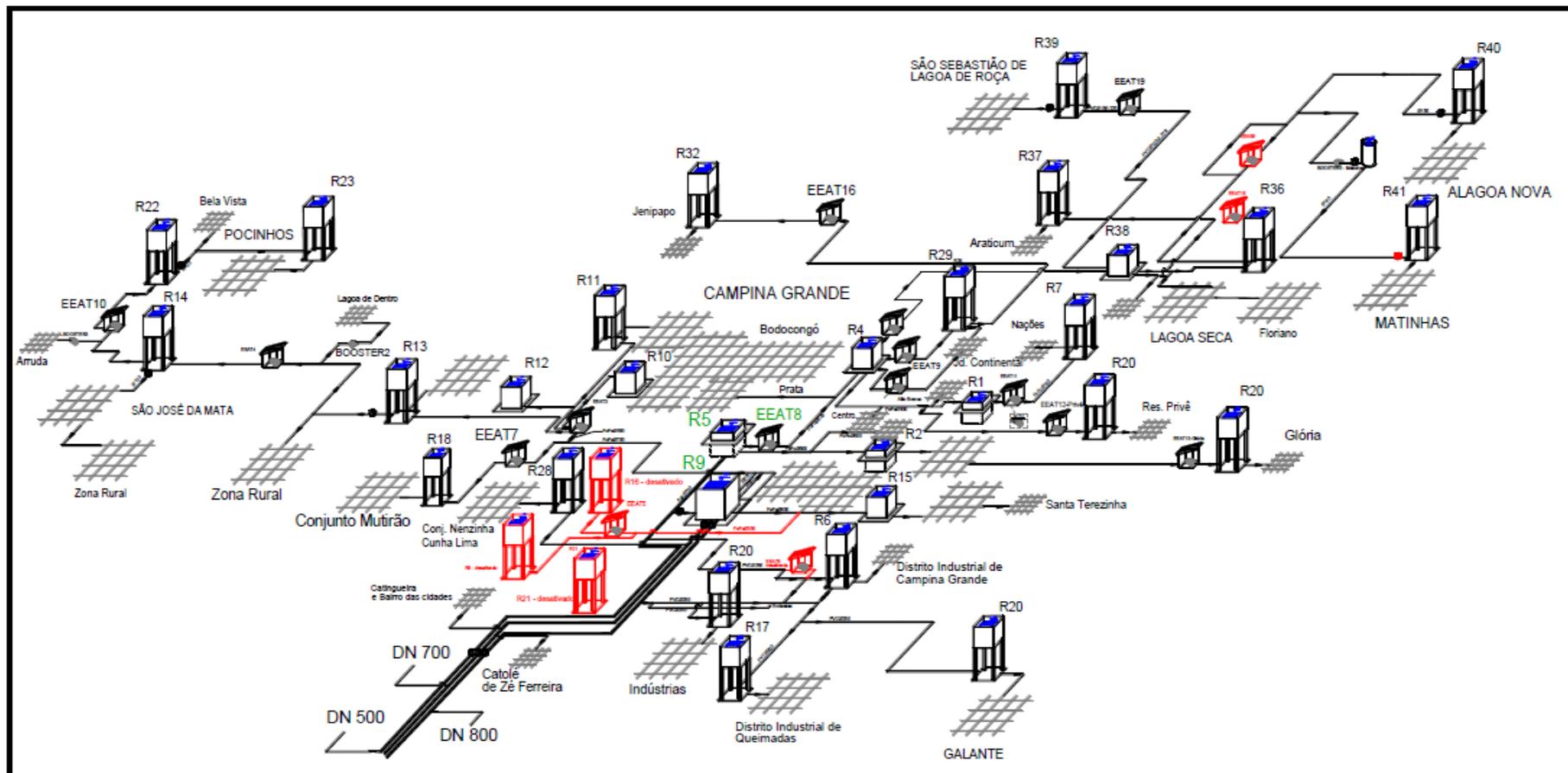
A Figura 3.8 esquematiza o manancial de Boqueirão, a estação de tratamento de Gravatá e algumas localidades atendidas e a Figura 3.9 resume as demais unidades operacionais (adutoras, estações elevatórias e reservatórios), como também as localidades atendidas, sendo esquematizadas a partir das adutoras de água tratada.

Figura 3.8 - Manancial, estação de tratamento do SACG e algumas localidades atendidas .



Fonte: Meneses (2011).

Figura 3.9 – Unidades operacionais e localidades atendidas do SACG.



Fonte: Meneses (2011).

3.3 PONTOS AMOSTRADOS

Os pontos de monitoração da rede de distribuição foram escolhidos seguindo as recomendações da *Diretriz Nacional do Plano de Amostragem da Vigilância em Saúde Ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano* (BRASIL, 2006c) que recomenda locais estratégicos de população vulnerável como hospitais, creches e escolas. Além de áreas de intermitência de abastecimento, de grande circulação de pessoas, de baixa pressão e pontas de rede. A Tabela 3.3 apresenta a localização de cada ponto analisado.

Tabela 3.3 - Localização dos pontos analisados

PONTOS	ENDEREÇO	COORDENADAS
P1 –Universidade Estadual da Paraíba	Rua Das Baraúnas, s/n, Bairro Bodocongó.	07°12'30.1"S 35°54'58.8"O
P2 - E.E.E.F.M São Miguel Leão	Rua José Miguel, s/n, Distrito de São José da Mata.	07°13'2.60"S 35°52'58.9"O
P3 - E.E. Severino Cabral	Rua Joaquim Amorim Junior, s/n, Bairro Severino Cabral.	07°13'40.74"S 35°55'8.96"O
P4 – Escola Municipal Ana Azevedo	Av. Das Nações, s/n, Bairro das Nações.	07°11'45.2"S 35°52'47.1"O
P5 - Vila Olímpica Plínio Lemos	Rua Josino Agra, s/n, Bairro José Pinheiro.	07°13'14.7"S 35°52'14.3"O
P6 – E.E.E.F.M. Solón de Lucena	Rua Hernani Laurentzi, s/n, Bairro Centro.	07°12'55.7"S 35°52'55.8"O
P7 - E.E.E.F. Monte Carmelo	Av. Prof. Carlos Francisco de Almeida, s/n, Bairro Bela Vista.	07°13'18.4"S 35°54'12.5"O
P8 - E.E.E.F.M. Clementino Procópio	Rua Felipe Camarão, s/n, Bairro São José.	07°13'30.3"S 35°53'26.2"O
P9 - E.E.E.F.M. Félix Araújo	Rua Severino Pimentel, s/n, Bairro Liberdade.	07°14'32.2"S 35°53'37.3"O
P10 – Hospital Universitário Alcides Carneiro (CAESE)	Rua Dr. Chateaubriand, s/n, Bairro São José.	07°13'36.26"S 35°53'30.43"O
P11 – Hospital Universitário Alcides Carneiro	Rua Carlos Chagas, s/n, Bairro São José.	07°13'35.93"S 35°53'30.70"O
P12 - E.M.E.F. Melo Leitão	Rua Anacleto Eloy, s/n, Bairro Quarenta.	07°13'59.28"S 35°53'57.24"O

Fonte: Autor (2012).

3.4 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados de monitoração da qualidade de água dos pontos já descritos trabalhados para avaliação de risco foram cedidos pelo Projeto de Pesquisa Levantamento de indicadores sentinelas para a vigilância da qualidade da água de abastecimento de Campina Grande (PB)

tendo as determinações de cloro residual livre, turbidez e pH sido determinados, seguido os procedimentos analíticos recomendados pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1999), entre os anos de 2008 e 2011.

Inicialmente, o conjunto de dados coletados, englobando 626, 625 e 617 análises, respectivamente, dos indicadores CRL, turbidez e pH, foi organizada uma planilha para em seguida, proceder à detecção e remoção de *outliers*, que são valores atípicos, ou seja, observações que apresentam um grande afastamento da série. Para identificação de *outliers* foi aplicado o Método de Grubbs (SOKAL & ROHLF, 1995) aos dados que seguem a distribuição lognormal, num nível de significância de 5% ($\alpha= 0,05$) a um número de observações que variaram de acordo com o ponto e o ano como dispostas na Tabela 3.4 que apresenta os números de observações ao longo do período do projeto de pesquisa.

Tabela 3.4 - Quantidade de observações em cada ponto

PONTO	ANO			
	2008	2009	2010	2011
P1	28	NA	37	NA
P2	28	NA	NA	NA
P3	27	NA	32	NA
P4	NA	18	31	NA
P5	NA	19	30	NA
P6	NA	19	30	31
P7	NA	17	37	NA
P8	NA	17	30	30
P9	NA	18	31	NA
P10	NA	30	NA	NA
P11	NA	55	NA	NA
P12	NA	NA	NA	31

Nota: NA - Não analisado

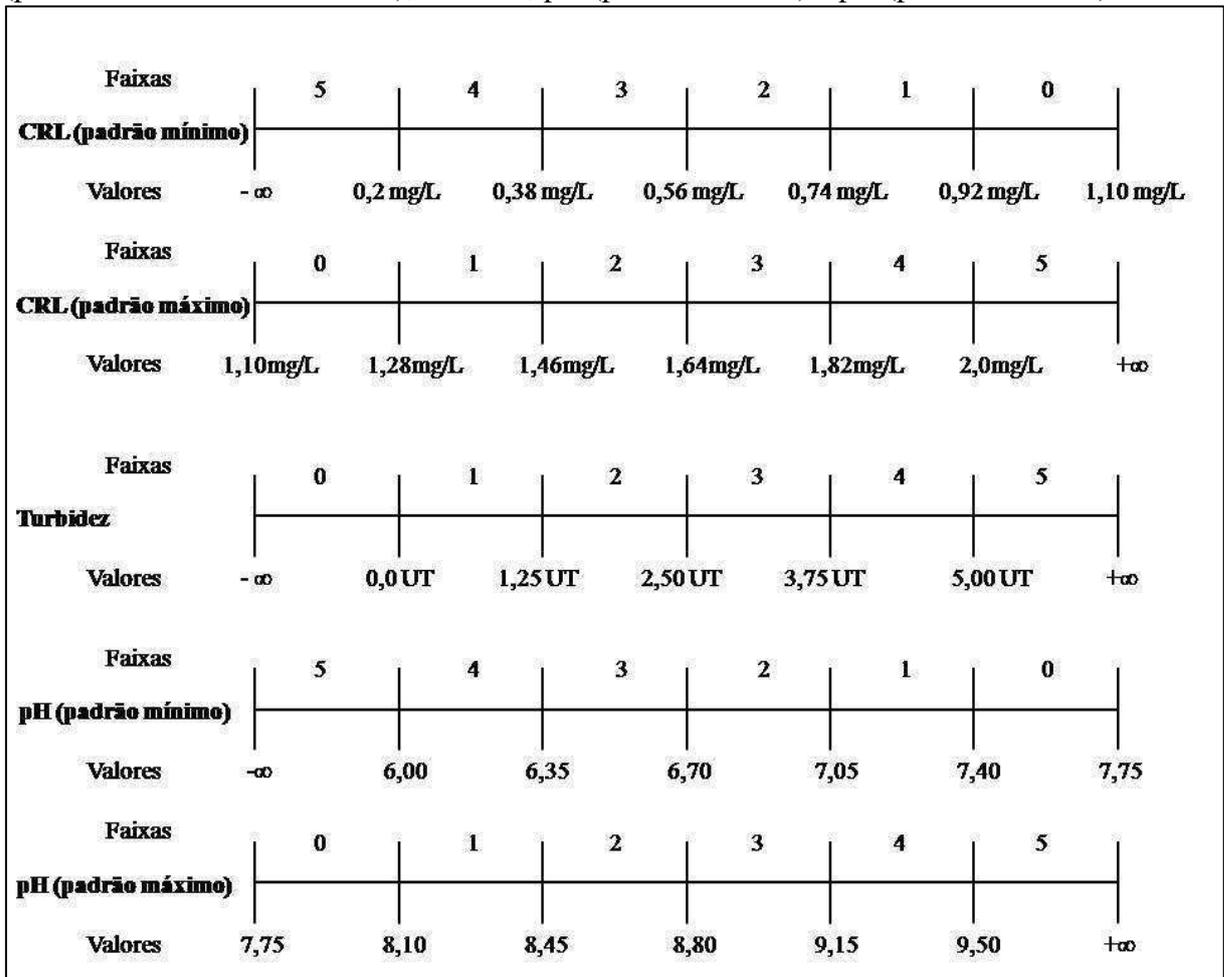
Fonte: Autor (2012)

3.5. CLASSIFICAÇÃO DOS RISCOS

Foi criada uma classificação com base nos valores recomendados pela Portaria MS 2914/2011 para os indicadores referidos (Figura 3.10). A classificação consiste numa divisão de seis faixas representadas por escores de zero a cinco, onde o escore 0 indica risco nulo e o escore 5, risco máximo. Para indicadores que a Portaria estabelece limites mínimos e

máximos, como CRL e pH, foram calculadas as médias entre os limites e criadas duas regiões, uma do valor mínimo até a média e outra da média ao valor máximo. O símbolo $+\infty$ representa os valores acima do limite máximo e $-\infty$ os valores abaixo do limite mínimo.

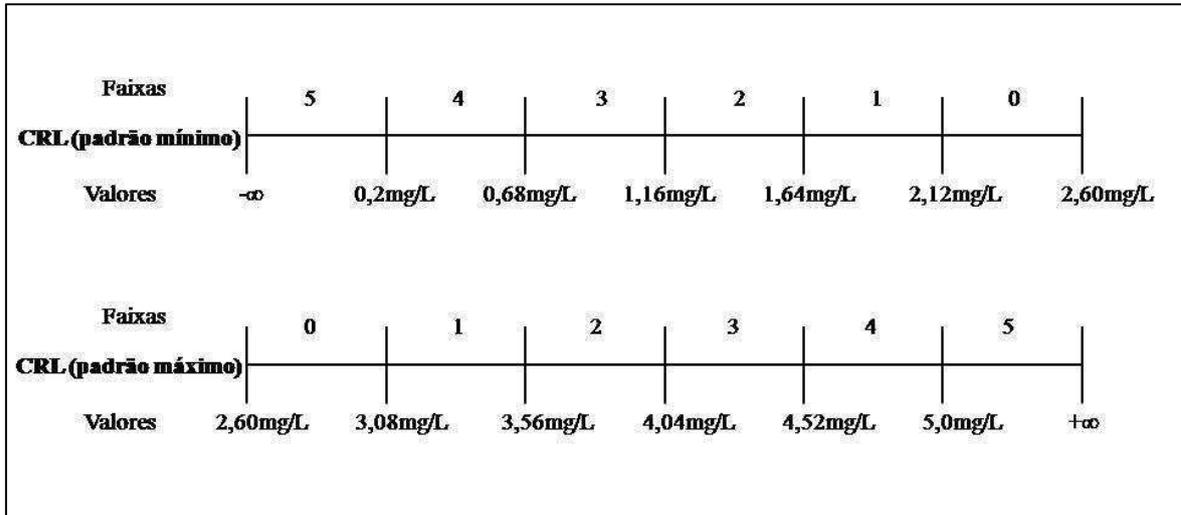
Figura 3.10 - Classificação para os indicadores CRL (padrão mínimo recomendado), CRL (padrão máximo recomendado), turbidez, pH (padrão mínimo) e pH (padrão máximo).



Fonte: Ogata (2011).

Como a Portaria estabelece para o cloro livre residual, um valor máximo recomendado de 2,0 mg/L, como também o Valor Máximo Permitido (VMP) de 5,0 mg/L, foi criada uma outra classificação dividindo em faixas considerando o valor de 5,0 mg/L para o CRL (Figura 3.11)

Figura 3.11 – Classificação para o indicador CRL (valor máximo permitido).



Fonte: Autor (2013).

3.6. CÁLCULOS DOS RISCOS

Após o preenchimento dos escores de severidade, ocorrência, detecção e abrangência do formulário FMEA, foi necessário descobrir o percentual de cada risco considerado (alta concentração de CRL, baixa concentração de CRL, alta turbidez, alto pH e baixo pH) no risco total do sistema de abastecimento, levando em consideração que todos os riscos que podem ocorrer num sistema de abastecimento se referem aos riscos contidos no formulário FMEA.

A porcentagem de cada risco no risco total do sistema foi calculada dividindo o risco individual pela soma de todos os riscos, como expresso na Equação 3.1.

$$P = \frac{R_i}{\sum_1^n R}$$

Eq. 3.1

Em que:

P = Ponderação

R_i = Risco individual

n = Quantidade de riscos

$\sum R$ = Soma dos riscos

3.7. AVALIAÇÃO DE RISCO

A análise de risco abrange três etapas: avaliação, gerenciamento e comunicação de risco. Todavia, o presente trabalho realizou apenas a avaliação de risco como contribuição para que o responsável pelo serviço de abastecimento e a autoridade de saúde procedam ao gerenciamento e a comunicação de risco. Diante das diferentes técnicas de avaliação de risco foram escolhidos: FMEA e Árvore de Falhas, por melhor se adequarem as necessidades do trabalho e as limitações no que se relaciona ao sistema de abastecimento de água.

3.7.1. Aplicação do FMEA

Foi elaborado um formulário FMEA, onde os valores dos escores obedeciam aos critérios estabelecidos na Tabela 3.5 para sua determinação.

Tabela 3.5 – Tabela de escores

Escore para Severidade		
	Severidade da não conformidade	Classificação
Alta	Substâncias muito danosa ao meio ambiente, causam efeitos graves à saúde humana, apresentam características de corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.	3
Moderada	Substâncias danosas ao meio ambiente causam efeitos leves à saúde humana (irritações ou alergias) com longo tempo de decomposição.	2
Baixa	Substâncias pouco danosas ao meio ambiente causam efeitos negativos à saúde humana e possuem curto tempo de decomposição.	1
Escore para Ocorrência		
	Ocorrência da não conformidade	Classificação
Alta	O impacto ambiental ocorre entre 2/3 das amostras ao total das amostras.	3
Moderada	O impacto ambiental ocorre entre 1/3 e 2/3 do total das amostras.	2
Baixa	O impacto ambiental ocorre em até 1/3 do total das amostras.	1
Escore para Detecção		
	Detecção da não conformidade	Classificação
Baixa	Para detectar a não conformidade é necessária a utilização de tecnologias sofisticadas e custosas	3

	(financeiramente e temporalmente).	
Moderada	A não conformidade é percebida com a utilização de medições simples (titulações, pHmômetros, turbidímetros, entre outros).	2
Alta	A não conformidade pode ser percebida a olho nu.	1
Escore para Abrangência		
Abrangência da não conformidade		Classificação
Alta	A não conformidade alcança áreas além do sistema de abastecimento de água (até as ligações prediais).	3
Moderada	A não conformidade alcança até os limites do sistema de abastecimento de água (nas proximidades do reservatório e pontos de manutenção da qualidade de água).	2
Baixa	A não conformidade alcança apenas o local onde ocorre a potabilização (na ETA).	1

4 RESULTADOS

A quantidade de amostras por ponto variou pelo fato de alguns pontos serem analisados apenas em um ano, enquanto outros pontos foram analisados por três anos consecutivos. Utilizando o aplicativo do Excel, foi aplicada a estatística descritiva a cada conjunto de dados (CRL, turbidez, pH) e verificada a ocorrência de conformidades e não conformidades com a Portaria MS 2914/2011.

A Tabela 4.1 apresenta as frequências de conformidades e não conformidades, como também as médias, medianas e desvios padrões para cada variável, considerando a totalidade do período do projeto de pesquisa.

Tabela 4.1 – Estatística descritiva e frequência de conformidades e não conformidades de indicadores sentinelas da qualidade da água.

Ponto	Variável	Média	Mediana	Desvio padrão	Conformidade		Não conformidade	
					N	%	N	%
P1	pH	7,52	7,59	0,35	62	100,0	0	0,0
	Turbidez	1,76	0,78	1,68	62	95,38	3	4,62
	CRL	0,62	0,61	0,47	48	73,85	17	26,15
P2	pH	7,28	7,31	0,20	27	100,0	0	0,0
	Turbidez	2,85	2,88	1,19	26	92,86	2	7,14
	CRL	0,60	0,49	0,51	20	71,43	8	28,57
P3	pH	7,24	7,21	0,32	56	100,0	0	0,0
	Turbidez	1,70	1,27	1,25	58	98,31	1	1,69
	CRL	1,24	1,37	0,77	45	76,27	14	23,73

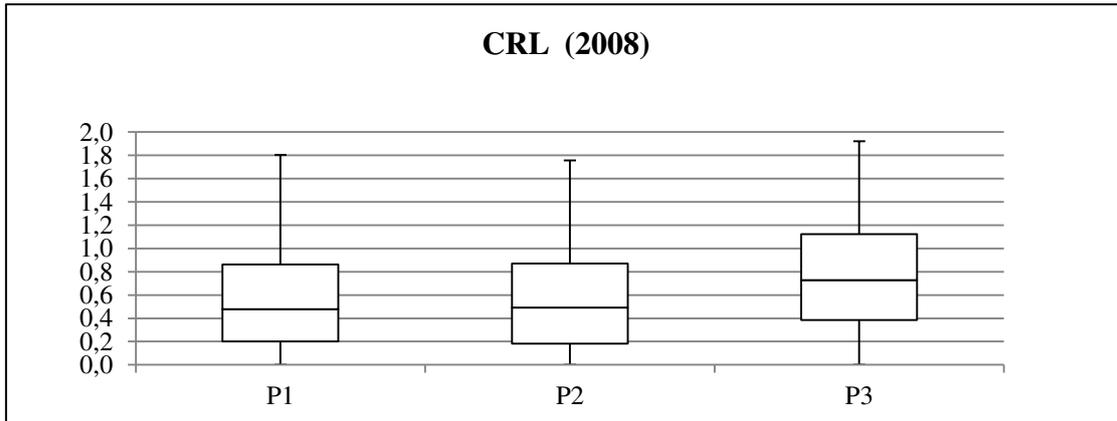
Ponto	Variável	Média	Mediana	Desvio padrão	Conformidade		Não conformidade	
					N	%	N	%
P4	pH	7,37	7,34	0,38	48	100,0	0	0,0
	Turbidez	1,09	0,85	0,61	49	100,0	0	0,0
	CRL	1,43	1,31	0,84	41	83,67	8	16,33
P5	pH	7,42	7,50	0,51	47	100,0	0	0,0
	Turbidez	1,42	0,80	1,31	46	83,64	9	16,36
	CRL	1,31	1,40	0,58	44	89,80	5	10,20
P6	pH	7,23	7,25	0,44	79	100,0	0	0,0
	Turbidez	3,66	1,73	4,46	59	73,75	21	26,25
	CRL	1,52	1,59	0,79	59	73,75	21	26,25
P7	pH	7,40	7,37	0,43	53	100,0	0	0,0
	Turbidez	0,93	0,82	0,52	53	100,0	0	0,0
	CRL	2,28	2,19	0,92	22	40,74	32	59,26
P8	pH	7,21	7,25	0,43	77	100,0	0	0,0
	Turbidez	2,48	1,75	2,77	70	90,91	7	9,09
	CRL	0,06	0,00	0,23	4	5,19	73	94,81
P9	pH	7,47	7,42	0,44	49	100,0	0	0,0
	Turbidez	0,86	0,72	0,53	49	100,0	0	0,0
	CRL	1,49	1,53	0,65	37	75,51	12	24,49
P10	pH	7,25	7,22	0,20	30	100,0	0	0,0
	Turbidez	1,75	1,13	1,00	30	100,0	0	0,0
	CRL	2,47	2,30	1,39	14	46,67	16	53,33
P11	pH	7,78	7,78	0,19	55	100,00	0	0,0
	Turbidez	1,29	1,00	0,72	55	100	0	0,0
	CRL	0,00	0,00	0,00	0	0,0	55	100,0
P12	pH	6,56	6,63	0,54	25	80,65	6	19,35
	Turbidez	3,64	2,83	2,24	23	74,19	8	25,81
	CRL	2,28	2,38	0,66	12	38,71	19	61,29

Fonte: Autor (2012).

Para melhor observação dos valores mínimos, medianas e valores máximos ocorridos no quadriênio estudado, como também a frequência das amostras de cada ponto, os resultados das análises de CRL, turbidez e pH foram representados em gráficos *Box plot* (gráfico de caixas) nas Figuras 4.1(a), (b) e (c), 4.2(a), (b) e (c), 4.3 (a), (b) e (c) e 4.4 (a), (b) e (c).

Como podem ser observados na Figura 4.1 (a), os pontos P1 e P2, em 2008, apresentaram uma distribuição semelhante, 25% das observações nos dois pontos, estiveram abaixo de 0,2 mg/L, o mínimo recomendado para CRL. O intervalo interquartil desses pontos que corresponde a 50% das amostras esteve entre 0,2 e 0,8 mg/L, com mediana igual a 0,5 mg/L. Sendo o limite superior das observações de 1,8 mg/L. Enquanto no P3, o primeiro quartil (25% das amostras) esteve abaixo de 0,4 mg/L, 50% das observações estiveram entre 0,4 e 1,1 mg/L e seu limite superior foi 1,9 mg/L. Os três gráficos apresentam assimetria na distribuição dos dados, pois a mediana não é equidistante aos extremos (limite inferior e superior).

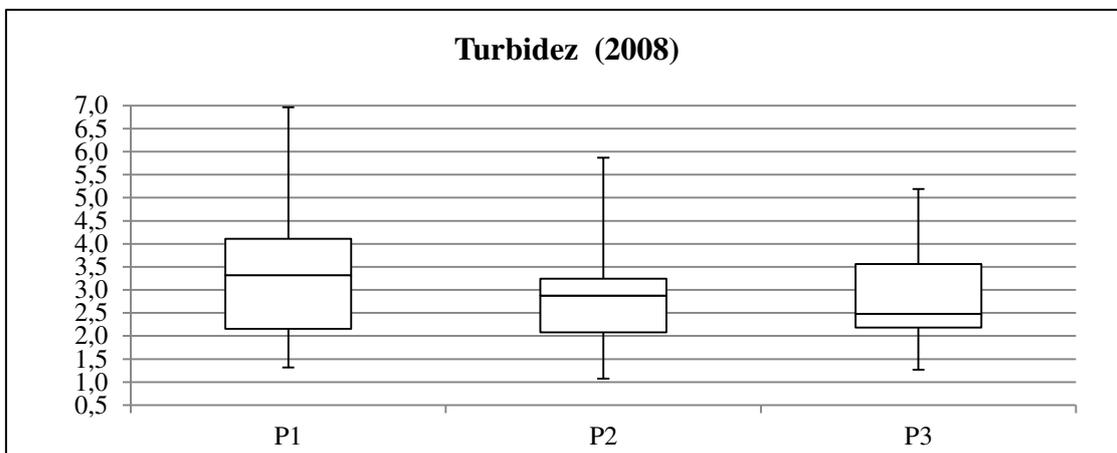
Figura 4.1(a) - *Box plot* para o indicador CRL em 2008.



Fonte: Autor (2012).

Para o indicador turbidez, de forma geral, os pontos tiveram, no ano de 2008, como primeiro quartil entre 1,0 ou 1,3 NTU e 2,3 NTU. O intervalo interquartil esteve entre 2,2 e 4,2 NTU no ponto P1, 2,1 e 3,3 NTU no P2 e 2,2 e 3,5 NTU no P3. Tendo, os respectivos pontos, as seguintes medianas 3,3, 2,8 e 3,5 NTU, sendo seus limites superiores 6,9, 5,8 e 5,2 NTU, concluindo que a distribuição dos dados é assimétrica nos três pontos. [Figura 4.1.(b)].

Figura 4.1(b) – *Box plot* para o indicador turbidez em 2008.

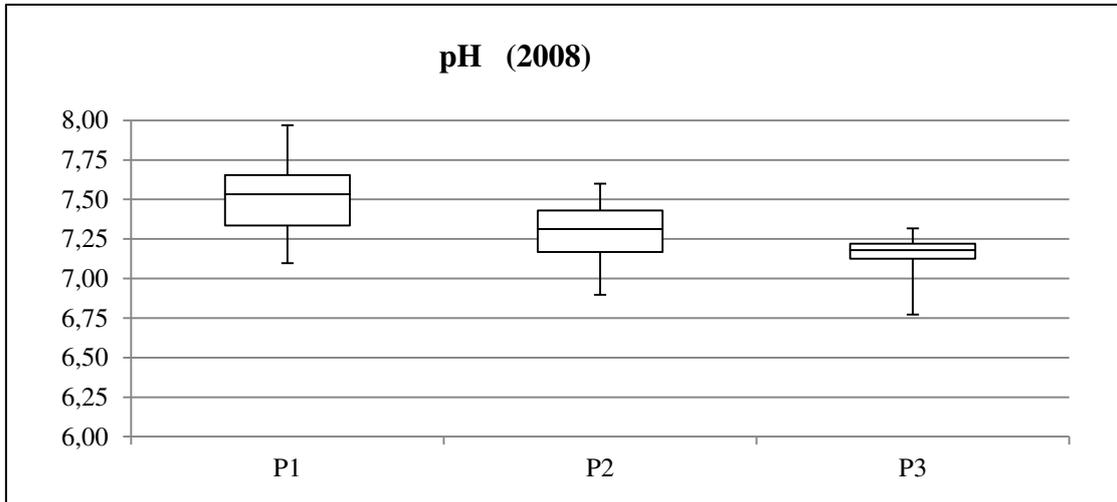


Fonte: Autor (2012).

Nas observações do mesmo ano para o indicador pH do ponto P1, 25% das amostras (primeiro quartil) estiveram entre 7,1 e 7,3, o intervalo interquartil esteve entre 7,1 e 7,7, com mediana igual a 7,5 e limite superior igual a 7,9. No P2, o limite inferior foi 6,9 e o superior, 7,6, tendo o interquartil um intervalo de 7,1 a 7,4. Enquanto no P3, a distribuição dos dados foi bem mais assimétrica do que nos pontos P1 e P2. Observando o limite inferior

de 6,7, 25% das amostras estiveram abaixo de 7,1 e 75% abaixo de 7,2 com limite superior de 7,3. Todavia, nos três pontos, todas as amostras estiveram em conformidade com o estabelecido na Portaria. [Figura 4.1.(c)].

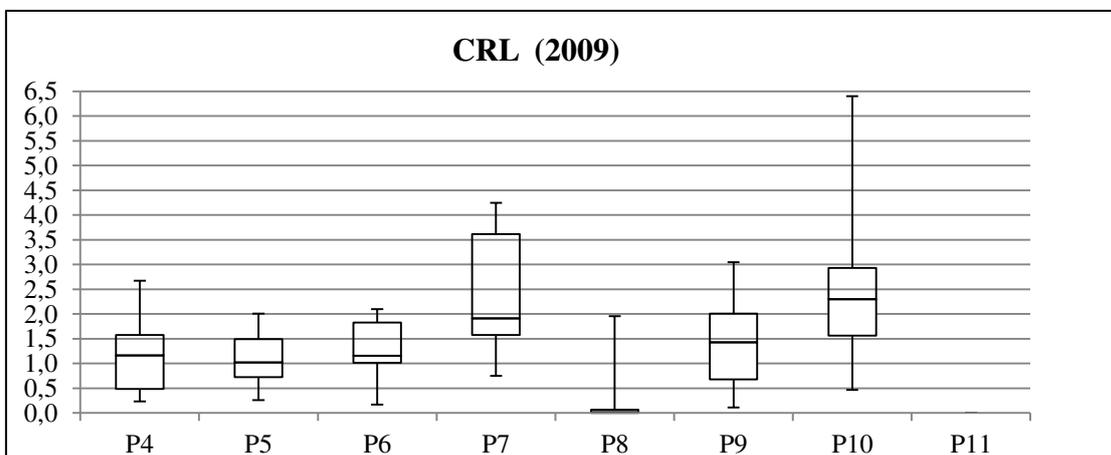
Figura 4.1(c) – *Box plot* para o indicador pH em 2008.



Fonte: Autor (2012).

Em 2009, os gráficos que estiveram mais assimétricos para CRL foram do P7, P8 e P10. No P7, a partir do limite inferior de 0,7, 25% das amostras estiveram abaixo de 1,6, 50% abaixo de 1,9 e 75% abaixo de 3,9 mg/L. No P8, 75% das amostras estiveram abaixo de 0,1 mg/L e 25% entre 0,1 e 1,9 mg/L, os intervalos definidos no gráfico não permitiram observar o primeiro quartil e a mediana do P8, por seus intervalos estarem bastante abaixo dos demais pontos observados no mesmo ano [Figura 4.2 (a)].

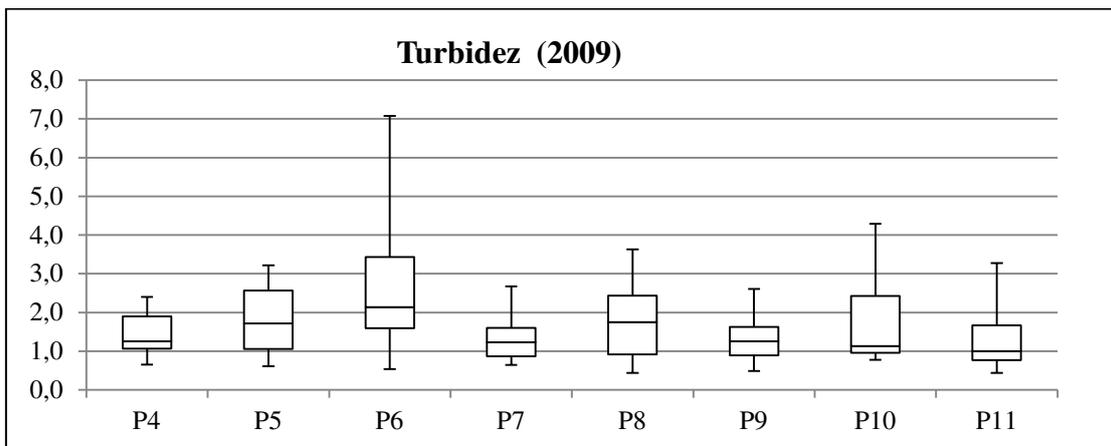
Figura 4.2 (a) - *Box plot* para o indicador CRL em 2009.



Fonte: Autor (2012).

Os limites inferiores de todos os pontos analisados estiveram próximos a 0,5 NTU. Alguns pontos se mostraram bastantes assimétricos à direita, ou seja, os desvios à direita da mediana são preponderantes aos desvios à esquerda da mediana, como mostra o P4, P6, P10 e P11. Enquanto o P6 foi o único ponto observado, em 2009, que apresentou amostras com valores superiores a 5,0 NTU. Uma vez que se observa no gráfico, 25% das amostras do P6 entre 3,5 e 7,0 NTU [Figura 4. (b)].

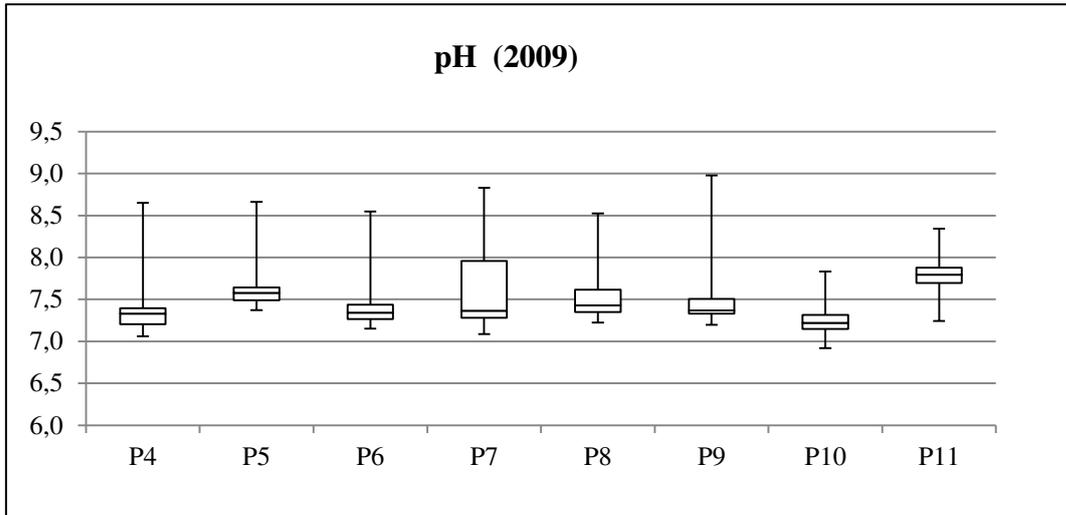
Figura 4.2 (b) - *Box plot* para o indicador turbidez em 2009.



Fonte: Autor (2012).

Os gráficos de pH dos pontos amostrados em 2009 apresentaram uma distribuição assimétrica à direita. Quando se tem uma assimetria à direita, observa-se a seguinte relação: $\text{Moda} < \text{Mediana} < \text{Média}$. Porém todas as amostras estiverem no intervalo de valor para pH estabelecido pela portaria de 6,0 a 9,5 [Figura 4.2 (c)]

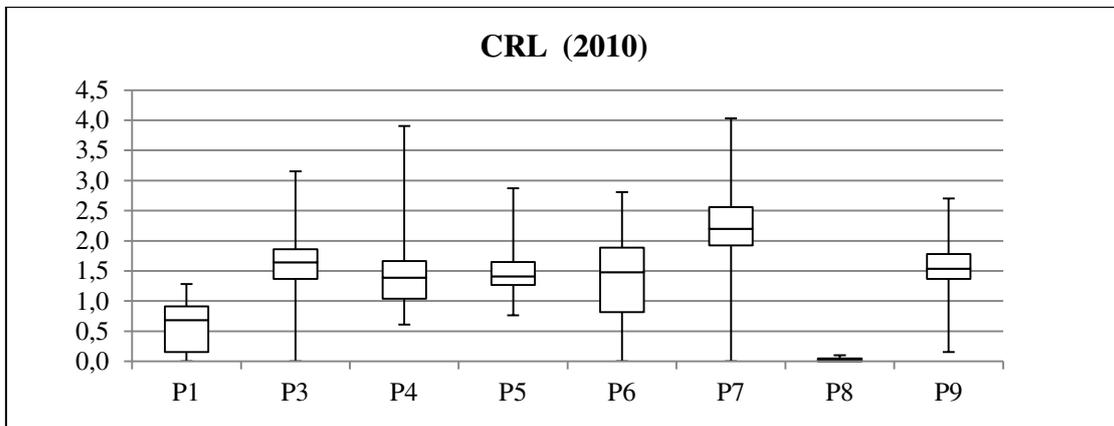
Figura 4.2 (c) - *Box plot* para o indicador pH em 2009.



Fonte: Autor (2012).

Em 2010, os pontos P1, P3, P7, P9 apresentaram assimetria à esquerda. As amostras do ponto P8, como ocorreu em 2009, estiveram com valores muito baixos comparados aos demais pontos e comparado ao mínimo permitido de 0,2 mg/L pela portaria. Embora, os pontos P3, P6 e P7 também apresentassem amostras com 0,0 mg/L de CRL. [Figura 4.3(a)].

Figura 4.3 (a) - *Box plot* para o indicador CRL em 2010.

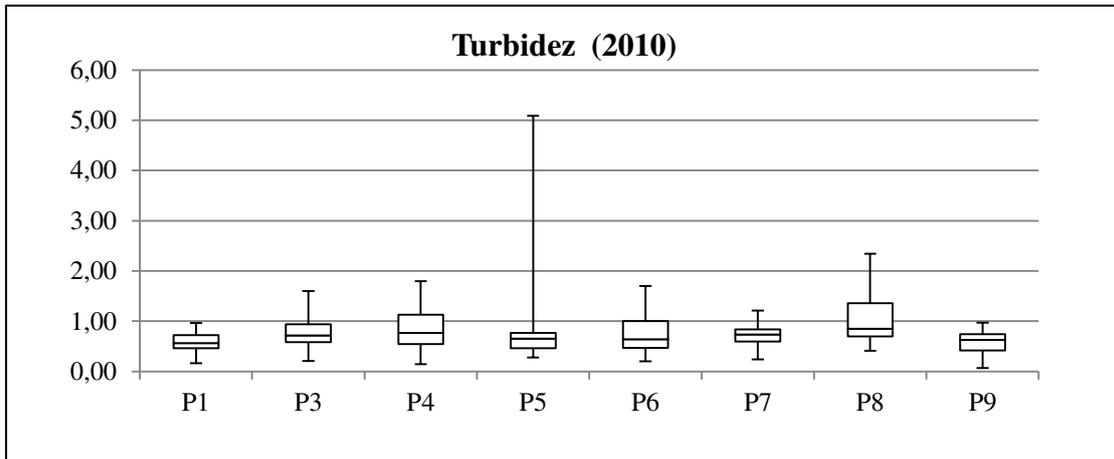


Fonte: Autor (2012).

Na Figura 4.3 (b), pode ser observada a assimetria à direita em alguns pontos, como P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P8, os pontos P7 e P9 apresentaram assimetria à esquerda. Quando a assimetria é à esquerda, os desvios à esquerda são preponderantes em relação aos desvios à direita, ou seja, o intervalo do limite inferior a mediana é mais alongado do que o intervalo da mediana ao limite superior. Na assimetria à esquerda, a relação é Média < Mediana < Moda.

Entretanto, no que diz respeito à portaria, apenas o ponto P5 apresentou amostras acima do permitido de 5,0 NTU.

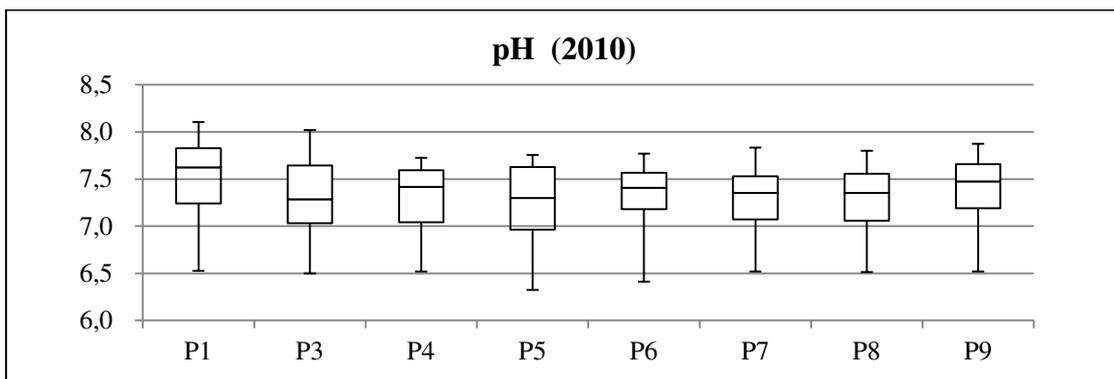
Figura 4.3 (b) - *Box plot* para o indicador turbidez em 2010.



Fonte: Autor (2012).

Os gráficos do indicador pH apresentaram assimetria à esquerda, exceto o P3, cujo limite inferior foi 6,5, mediana 7,3 e limite superior 8,0. Tiveram limites inferiores, em geral, igual a 6,5, com exceção dos pontos P5 e P6 e o P1 apresentou maior limite superior, igual a 8,1. Porém, nenhuma amostra esteve além dos padrões estabelecidos de 6,0 a 9,5 [Figura 4.3 (c)].

Figura 4.3 (c) - *Box plot* para o indicador pH em 2010.

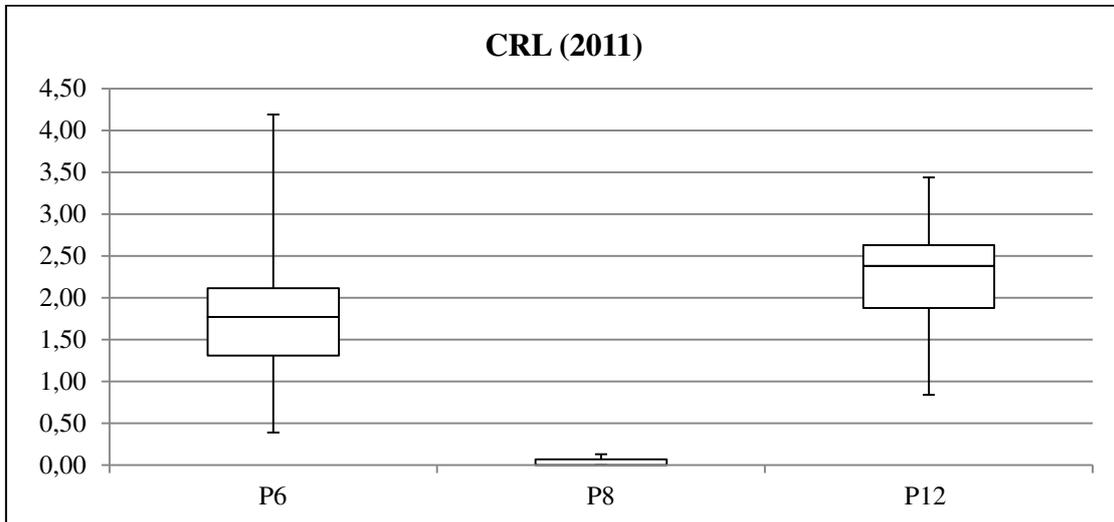


Fonte: Autor (2012).

Os pontos P6 e P12, analisados em 2011, tiveram suas amostras acima do mínimo de 0,2 mg/L de CRL recomendado na portaria, com limites inferiores de 0,35 e 0,80 mg/L, medianas de 1,75 e 3,45 mg/L e limites superiores de 4,20 e 3,45 mg/L, com assimetria à direita e assimetria à esquerda, respectivamente. De acordo com os intervalos estabelecidos ao

conjunto dos dados, não foi possível observar o limite inferior, nem a mediana do ponto P8, mas pode ser observado que todas as amostras estiveram abaixo de 0,2 mg/L.

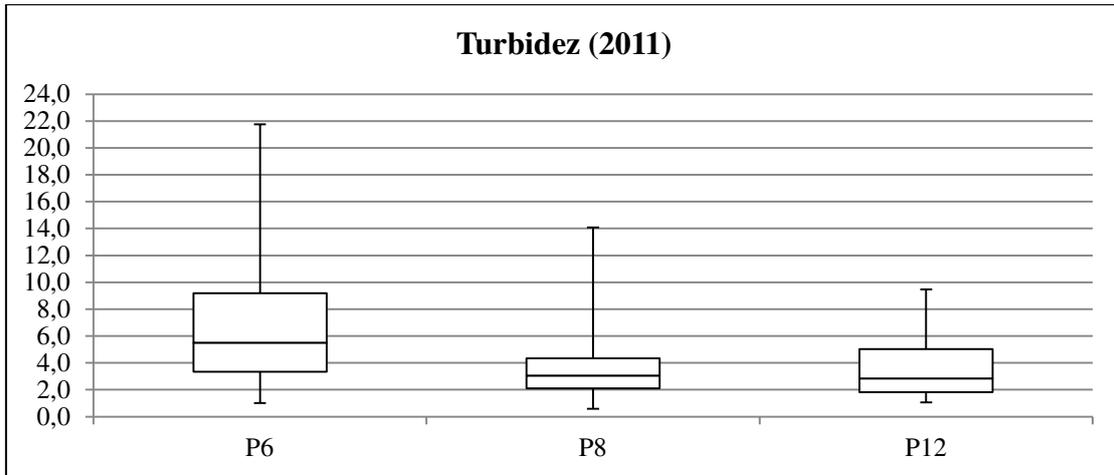
Figura 4.4 (a) - *Box plot* para o indicador CRL em 2011.



Fonte: Autor (2012).

De acordo com a Figura 4.4 (b), o ponto P6 foi o ponto que apresentou maiores valores para turbidez, onde mais de 50% de suas amostras apresentaram valor superior a 5,0 NTU, com limite superior de 22,0 NTU. O P8 teve seu intervalo interquartil abaixo de 5,0 NTU. Assim sendo, 75% das amostras estavam abaixo do máximo permitido, embora o limite superior das amostras tenha sido 14,0 NTU. O P12 apresentou uma mediana de 3,0 NTU e um limite superior próximo de 10, NTU, 25% das amostras estiveram acima do máximo permitido. Todos os três pontos apresentaram assimetria à direita, ou seja, $\text{Moda} < \text{Mediana} < \text{Média}$.

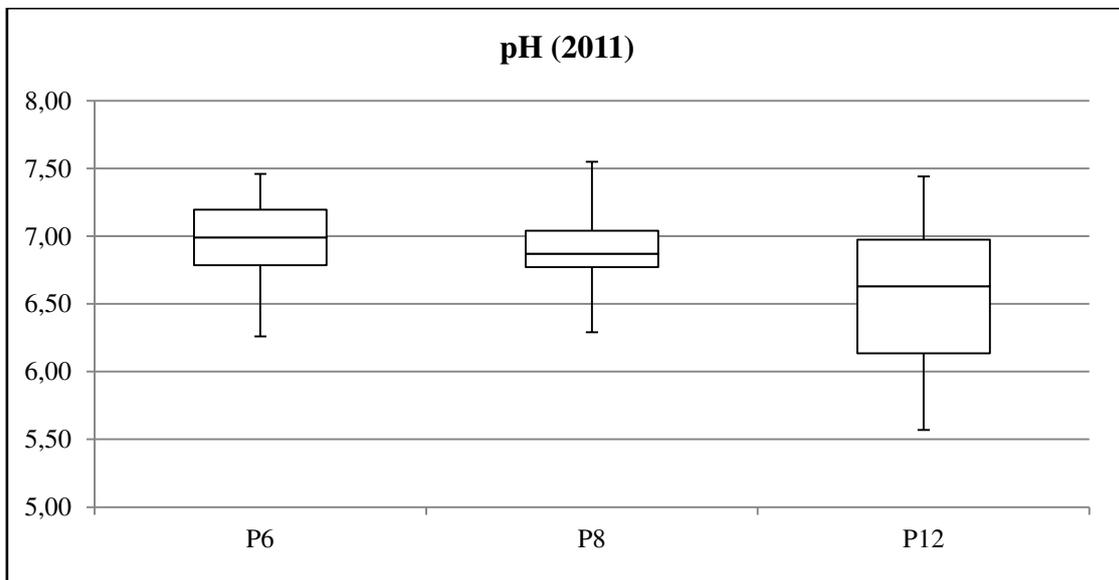
Figura 4.4 (b) - *Box plot* para o indicador turbidez em 2011.



Fonte: Autor (2012).

O pH dos pontos P6, P8 e P12 estiveram entre os limites inferiores de 6,25, 6,30 e 5,55 e limites superiores de 7,45, 7,55 e 7,45, com medianas iguais a 7,00, 6,78 e 6,62. Podendo concluir que a distribuição dos dados foi assimétrica à esquerda, à direita e à esquerda, respectivamente [Figura 4.4 (c)].

Figura 4.4 (c) - *Box plot* para o indicador pH em 2011.

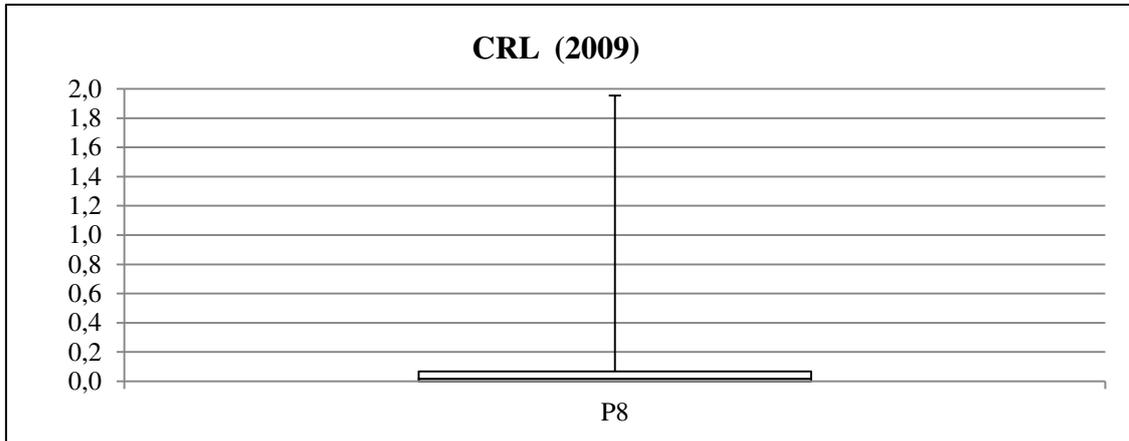


Fonte: Autor (2012).

Em razão do Ponto P8 apresentar um teor de cloro residual livre (CRL) mais baixo que os demais pontos analisados no mesmo período, foram necessários elaborar gráficos individuais para esse ponto, como ilustrado nas Figuras 4.5 (a), (b) e (c).

Em 2009, o intervalo interquartil teve valores menores que 0,1 mg/L, com mediana igual a 0,0 mg/L. Assim, 75% das amostras estiveram abaixo de 0,1 mg/L e 25% das amostras entre 0,1 e 1,9 mg/L. A distribuição dos dados é assimétrica à direita [Figura 4.5 (a)].

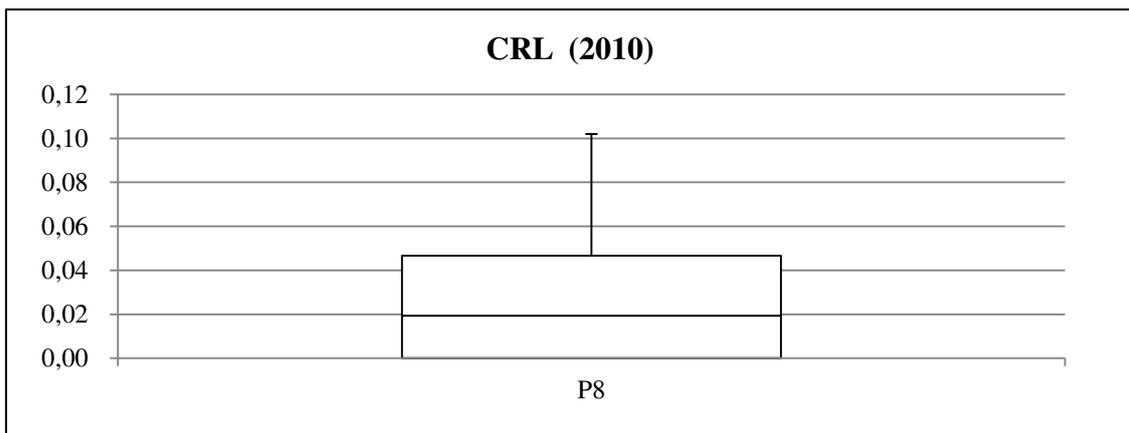
Figura 4.5 (a) - *Box plot* do indicador CRL no ponto P8 em 2009.



Fonte: Autor (2012).

Em 2010, o intervalo interquartil esteve entre 0,0 e 0,048 mg/L, com mediana igual a 0,02 mg/L e limite superior igual a 0,1 mg/L, com distribuição assimétrica à direita. Todas as amostras estiveram abaixo do mínimo permitido de 0,2 mg/L.

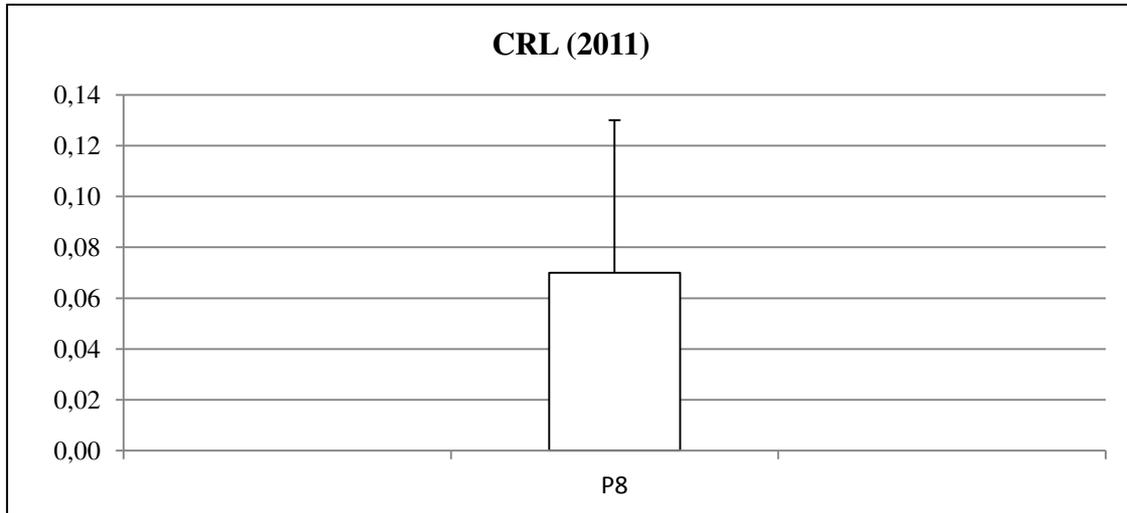
Figura 4.5 (b) - *Box plot* do indicador CRL no ponto P8 em 2010.



Fonte: Autor (2012).

Nas amostras do ponto P8, em 2011, a mediana foi 0,0 mg/L, 25% das amostras estiveram entre 0,0 e 0,08 mg/L e os outros 25% entre 0,07 e 0,11 mg/L, nenhuma amostra apresentou concentração mínima de cloro exigida pela Portaria.

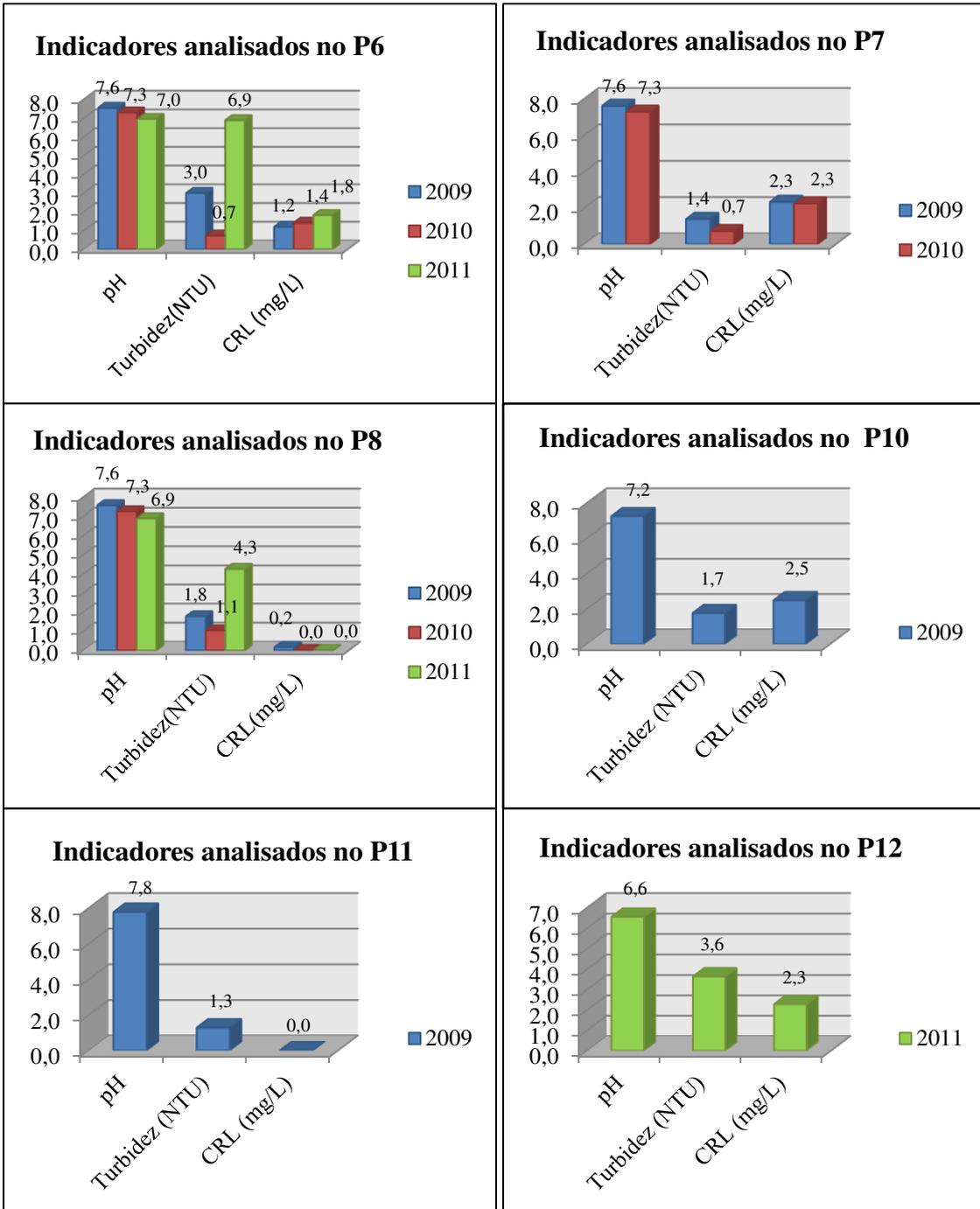
Figura 4.5 (c) - *Box plot* do indicador CRL no ponto P8 em 2011.



Fonte: Autor (2012).

A Figura 4.6 mostra o comportamento dos indicadores nos pontos que tiveram maior número de amostras em não conformidade com o valor recomendado na Portaria vigente, 2914/11. O ponto P6, em 2011, teve uma média de 6,89 UT, com 54,8% das amostras, ou seja, 17 das 31 amostras acima de 5,0 UT. No ponto P7, 57,4% das amostras estavam acima do recomendado, ou seja, 31 num total de 54 amostras. Como já foi observado através dos gráficos *Box plot*, o ponto P8 apresentou frequentemente valores abaixo do recomendado na portaria, num total de 77 amostras referentes aos três anos analisados, 94, 80% estiveram abaixo de 0,2 mg/L. O P10 apresentou uma média de 2,5 mg/L de CRL, onde 53,33% de 30 amostras estiveram acima do recomendado, mas apenas duas amostras estiveram acima do máximo permitido de 5,0 mg/L. No P11, as 30 amostras analisadas no ano de 2009 apresentaram ausência total de cloro residual livre. O ponto P12, analisado apenas em 2011, teve média de 2,3 mg/L, onde 61,3% de 31 amostras tiveram valor acima de 2,0 mg/L.

Figura 4.6 – Comportamento dos pontos com maior número de não conformidades



Fonte: Autor (2012).

A partir da classificação dos riscos exposta no item 3.5, foi atribuído à tendência central um valor para o risco. Posteriormente, esse valor será utilizado para, juntamente com o risco total obtido do formulário FMEA, quantificar o risco individual de cada ponto amostrado (Tabela 4.2 e Tabela 4.3).

Tabela 4.2 – Resultado da classificação dos indicadores CRL, turbidez e pH (valores recomendados)

	PONTO/PERÍODO ANALISADO	CRL	TURBIDEZ	pH
Tendência Central (Média)	P1/ 2008-2010	0,6161 mg/L	1,9476 UT	7,5097
Classificação		2	1	0
Tendência Central (Média)	P2/2008	0,5962 mg/L	2,8495 UT	7,2802
Classificação		2	2	1
Tendência Central (Média)	P3/2008-2010	1,2052 mg/L	1,7851 UT	7,2257
Classificação		0	1	1
Tendência Central (Média)	P4/2009-2010	1,3640 mg/L	1,1802 UT	7,3896
Classificação		1	1	1
Tendência Central (Média)	P5/2009-2010	1,2531 mg/L	1,5216 UT	7,4908
Classificação		0	1	0
Tendência Central (Média)	P6/2009-2010-2011	1,4817 mg/L	3,5443 UT	7,2757
Classificação		2	3	1
Tendência Central (Média)	P7/2009-2010	2,2950 mg/L	1,0552 UT	7,4549
Classificação		5	1	0
Tendência Central (Média)	P8/2009-2010-2011	0,0785 mg/L	2,3802 UT	7,2650
Classificação		5	2	1
Tendência Central (Média)	P9/2009-2010	1,4767 mg/L	0,9594 UT	7,4992
Classificação		2	0	0
Tendência Central (Média)	P10/2009	2,4730 mg/L	1,7498 UT	7,2463
Classificação		5	1	1
Tendência Central (Média)	P11/2009	0,0000 mg/L	1,2852 UT	7,7808
Classificação		5	1	0
Tendência Central (Média)	P12/2011	2,2835 mg/L	3,6448 UT	6,5574
Classificação		5	3	3

Fonte: Autor (2012).

Como foram criadas duas classificações diferentes para o valor recomendado e o máximo permitido para CRL, também foi necessário criar duas tabelas com o resultado de cada classificação. A Tabela 4.3 considera os valores obtidos na classificação que utilizou o valor máximo permitido.

Tabela 4.3 – Resultado da classificação dos indicadores CRL (máximo permitido), turbidez e pH.

	PONTO/PERÍODO ANALISADO	CRL	TURBIDEZ	pH
Tendência Central (Média)	P1/ 2008-2010	0,6161 mg/L	1,9476 UT	7,5097
Classificação		4	1	0
Tendência Central (Média)	P2/2008	0,5962 mg/L	2,8495 UT	7,2802
Classificação		4	2	1
Tendência Central (Média)	P3/2008-2010	1,2052 mg/L	1,7851 UT	7,2257
Classificação		2	1	1
Tendência Central (Média)	P4/2009-2010	1,3640 mg/L	1,1802 UT	7,3896
Classificação		2	1	1
Tendência Central (Média)	P5/2009-2010	1,2531 mg/L	1,5216 UT	7,4908
Classificação		2	1	0
Tendência Central (Média)	P6/2009-2010-2011	1,4817 mg/L	3,5443 UT	7,2757
Classificação		2	3	1
Tendência Central (Média)	P7/2009-2010	2,2950 mg/L	1,0552 UT	7,4549
Classificação		0	1	0
Tendência Central (Média)	P8/2009-2010-2011	0,0785 mg/L	2,3802 UT	7,2650
Classificação		5	2	1
Tendência Central (Média)	P9/2009-2010	1,4767 mg/L	0,9594 UT	7,4992
Classificação		2	0	0
Tendência Central (Média)	P10/2009	2,4730 mg/L	1,7498 UT	7,2463
Classificação		0	1	1
Tendência Central (Média)	P11/2009	0,0000 mg/L	1,2852 UT	7,7808
Classificação		5	1	0
Tendência Central (Média)	P12/2011	2,2835 mg/L	3,6448 UT	6,5574
Classificação		0	3	3

Ogata (2011) elaborou uma tabela de escores e um formulário FMEA adequando-os às características de águas de abastecimento público. Com base nesse trabalho foi possível estabelecer escores para o preenchimento do formulário, sem que fosse necessário realizar outra reunião FMEA com a mesma equipe para discutir escores para os aspectos severidade, detecção e abrangência para analisar os mesmos indicadores já debatidos no trabalho

anteriormente citado (Tabela 4.4). Os escores atribuídos no trabalho citado foram os mesmos, apenas acrescentando alguma causa ou efeito e modificando as medidas mitigadoras relacionadas aos riscos de alto e baixo pH.

Para o perigo da baixa concentração de CRL o escore de severidade foi definido como 3, visto que esse perigo traz consideráveis agravos à saúde humana pela maior probabilidade da presença de microrganismos patogênicos. O escore da ocorrência foi considerado 1, pois de um total de 626 amostras analisadas durante todo o período estudado, 168 estavam em desacordo com o padrão mínimo estabelecido, menos de 1/3 das amostras. A detecção teve um escore 2, porque a medição é realizada por procedimentos simples e a abrangência teve escore 3, devido ao decaimento do CRL ao longo das canalizações. O produto dos escores resultou num risco de 18. Para o perigo de alta concentração de CRL, a severidade recebeu escore 3, pois valores muito altos de CRL podem causar intoxicação, diarreia, alteração da flora intestinal e conforme Kalmaz e Kalmaz (1981), irritação das mucosas; a ocorrência teve escore 1, pois foram verificadas 112 não conformidades em 626 amostras, a detecção obteve escore 2, conforme explicado para a situação do perigo de baixa concentração de CRL, a abrangência foi considerada 2, pois mesmo que o perigo chegue até o consumidor, a tendência é o CRL diminuir com o passar do tempo e elevados valores geralmente são mais encontrados nas proximidades dos reservatórios. O risco total para a elevada concentração de CRL foi estimado em 12. Como o perigo da alta turbidez é um indicador da possibilidade de ocorrência de oocistos de protozoários na água, além da interferência no processo de desinfecção, foi determinado um escore de severidade 3, a ocorrência teve escore 1, onde 45 de 625 amostras estavam em não-conformidade com a portaria, a detecção teve um escore 2, pois a turbidez é medida através de aparelhagem simples e o escore abrangência foi 3, visto que a turbidez tende a permanecer e até mesmo aumentar na água ao longo do seu transporte nas canalizações. O risco foi estimado em 18.

O alto pH recebeu escore de severidade 2, pois ajuda na transformação do CRL em CRC, de poder desinfetante inferior ao primeiro, aumentando as chances de agravos à saúde. A ocorrência recebeu escore 1, mesmo não havendo nenhuma não conformidade com a Portaria MS 2914/2011, porque não existe risco nulo na metodologia FMEA. A detecção recebeu escore 2, visto que é necessário um pHmêtro para medição. O escore de abrangência foi 3, por este perigo não variar muito com o tempo, resultando num risco estimado de 12.

Para o perigo de baixo pH, o escore de severidade foi 1, pois o baixo pH auxilia na desinfecção, embora possa causar corrosão das tubulações e conseqüentemente, vazamentos que comprometem a qualidade da água. O escore da ocorrência foi 1, pois foram verificadas 6

não conformidades com a Portaria MS 2914/2011, num universo de 617 amostras. A detecção recebeu escore 2, em função do mesmo grau de dificuldade do perigo anteriormente analisado, podendo também, por analogia, ser explicado o valor de abrangência 3, resultando o risco total 6.

Tabela 4.4 – Formulário FMEA preenchido

Perigo	Tipo	Efeito	Causa	S	O	D	A	R	Medidas mitigadoras
Baixa concentração de CRL	R	Presença de organismos patogênicos	Falha na desinfecção, distância do ponto de cloração, presença de substâncias redutoras ou ausência de manutenção na rede	3	1	2	3	18	Aumento da dose de desinfetante, instalação de pontos de recloração ou manutenção da rede
Alta concentração de CRL	R	Intoxicação (diarreia, alteração da flora intestinal) e irritação das mucosas	Supercloração e proximidade do ponto à ETA	3	1	2	2	12	Utilização de doses ótimas de desinfetante
Alta turbidez	R	Aspecto desagradável e interferência na desinfecção	Aumento de sólidos suspensos no manancial, falha na coagulação, floculação, decantação ou filtração, distância do ponto de cloração, acumulação de sedimentos ao longo da rede, presença de biofilmes nas tubulações.	3	1	2	3	18	Melhorias no processo de remoção da turbidez

Continua

Tabela 4.4 – Formulário FMEA preenchido (Continuação)

Perigo	Tipo	Efeito	Causa	S	O	D	A	R	Medidas mitigadoras
Baixo pH	P	Potencial de corrosividade e agressividade nas tubulações	Falha nos processos e operações unitárias da ETA, como o uso de sulfato de alumínio em excesso ou falta de estabilização química.	1	1	2	3	6	Adição de hidróxido de cálcio na água
Alto pH	P	Possibilidade de incrustações nas tubulações, diminuição da eficiência da desinfecção, maior potencial de formação de THM	Falha nos processos e operações unitárias da ETA	2	1	2	3	12	Adição de ácido sulfúrico na água

Fonte: Adaptada de Ogata (2011)

Considerando, de forma simplificada, que todo risco inerente ao sistema de abastecimento resume-se aos riscos listados no formulário FMEA, foi estimada a importância percentual de cada risco analisado no risco total, como pode ser observado na Tabela 4.5

Tabela 4.5 – Ponderação dos riscos individuais

RISCO	RESULTADO DOS ESCORES	CÁLCULO DO RISCO	PORCENTAGEM
Baixa concentração de CRL	18	$18/66 = 0,2727$	27,2727%
Alta concentração de CRL	12	$12/66 = 0,1818$	18,1818%
Alta turbidez	18	$18/66 = 0,2727$	27,2727%
Baixo pH	6	$6/66 = 0,0909$	9,0909%
Alto pH	12	$12/66 = 0,1818$	18,1818%
Total	66	$66/66 = 1,00$	100%

Fonte: Autor (2012).

Com as classificações obtidas das Tabelas 4.2 e 4.3 e a ponderação dos riscos individuais (Tabela 4.5), foi estimado o risco total de um ponto, a partir da multiplicação da classificação do indicador pela ponderação do seu respectivo risco, e em seguida, o somatório de todos os produtos, resultando no risco total do sistema de abastecimento de água monitorado.

Exemplo:

$$P1 = [(2 \times 27,2727) + (1 \times 27,2727) + (0 \times 9,0909)] / 100 = 0,8181$$

Para melhor entendimento, o risco estimado foi classificado em 5 faixas como mostrado na Tabela 4.6, com base nos valores recomendados pela Portaria MS 2914/2011. Considerando 3,6 como o risco total máximo, devido à existência de alguns riscos excludentes, entre si. Por exemplo, se houver perigo de alta concentração de CRL, não existe perigo de baixa concentração de CRL e vice-versa, o mesmo ocorre com o indicador pH. Como mostra equação 4.1, supondo que todos indicadores, CRL, turbidez e pH, apresentem o risco máximo que pode alcançar.

$$\text{Risco máximo} = [(5 \times 27,2727) + (5 \times 27,2727) + (5 \times 18,1818)] / 100 = 3,63636 \quad \text{Eq.4.1}$$

Tabela 4.6 – Classificação do risco total considerando o valor recomendado

INTERVALO DE RISCO	CLASSIFICAÇÃO	PONTOS
$0 < x \leq 0,727$	Desprezível	P3, P4, P5 e P9.
$0,727 < x \leq 1,454$	Baixo	P1, P2, P6, P7 e P10.
$1,454 < x \leq 2,182$	Moderado	P8, P11 e P12.
$2,182 < x \leq 2,909$	Alto	
$2,909 < x \leq 3,636$	Crítico	

Fonte: Autor (2012).

Quando se utiliza o valor máximo permitido para CRL, alguns pontos que apresentavam elevadas concentrações de cloro passam a ocupar posições de riscos menores, como por exemplo, o P12 (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Classificação do risco total considerando o VMP

INTERVALO DE RISCO	CLASSIFICAÇÃO	PONTOS
$0 < x \leq 0,727$	Desprezível	P4, P7, P9, P10.
$0,727 < x \leq 1,454$	Baixo	P3, P5, P6, P12.
$1,454 < x \leq 2,182$	Moderado	P1, P2, P8, P11.
$2,182 < x \leq 2,909$	Alto	
$2,909 < x \leq 3,636$	Crítico	

Fonte: Autor (2013).

Mesmo o pH sendo um indicador de suma importância para o sistema de tratamento de água e para o processo de desinfecção, pode ser constatado pelos cálculos anteriores que sua inclusão na ponderação dos riscos amenizou o risco mais preocupante que é a baixa

concentração de CRL, fazendo que pontos que frequentemente apresentavam esse risco fossem classificados como de risco moderado.

Desde trabalhos anteriores, entre eles Galdino (2009), Barbosa (2010), Araújo (2010) e, principalmente, depois da análise do conjunto dos dados dos indicadores de qualidade da água distribuída em Campina Grande, neste trabalho, foi possível verificar que a análise da qualidade da água, para fins de vigilância, pode ser totalmente baseada no comportamento dos indicadores sentinelas cloro residual livre e turbidez, na ponderação dos riscos associados a eles e na aplicação de métodos subsequentes de análise de risco. A Tabela 4.8 resume a ponderação dos riscos associados aos indicadores sentinelas.

Tabela 4.8– Ponderação do risco individual utilizando apenas os indicadores sentinelas

RISCO	RESULTADO DOS ESCORES	CÁLCULO DO RISCO	PORCENTAGEM
Baixa concentração de CRL	18	$18/48 = 0,375$	37,5%
Alta concentração de CRL	12	$12/48 = 0,25$	25,0%
Alta turbidez	18	$18/48 = 0,375$	37,5%
Total	48	$48/48 = 1,00$	100%

Fonte: Autor (2012).

Foi elaborada uma classificação do risco total, considerando apenas os indicadores sentinelas, onde o risco máximo foi 3,75. Assim, o risco de cada ponto foi estimado (Tabela 4.9), considerando apenas os riscos relacionados ao CRL (valor recomendado) e à turbidez. Os pontos que apresentaram risco alto foram P8 que apresentou baixas concentrações de cloro residual livre e P12 com elevadas concentrações de CRL.

$$\text{Exemplo: } P1 = (2 \times 37,5 + 2 \times 37,5) / 100 = 1,5$$

Tabela 4.9 – Classificação do risco total considerando CRL (recomendado) e turbidez.

INTERVALO DE RISCO	CLASSIFICAÇÃO	PONTOS
$0 < x \leq 0,75$	Desprezível	P3, P4, P5 e P9.
$0,75 < x \leq 1,50$	Baixo	P1 e P2.
$1,50 < x \leq 2,25$	Moderado	P6, P7, P10 e P11.
$2,25 < x \leq 3,00$	Alto	P8 e P12.
$3,00 < x \leq 3,75$	Crítico	

Fonte: Autor (2012).

Utilizando o valor máximo permitido para CRL da portaria, apenas o P8 esteve classificado como de risco alto e o P12 passou de alto para baixo, já que seus pontos apresentavam concentrações elevadas apenas quando se relacionava com o valor de 2,0 mg/L (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 – Classificação do risco total considerando CRL (VMP) e turbidez.

INTERVALO DE RISCO	CLASSIFICAÇÃO	PONTOS
$0 < x \leq 0,75$	Desprezível	P1, P9, P10.
$0,75 < x \leq 1,50$	Baixo	P3, P4, P5, P12.
$1,50 < x \leq 2,25$	Moderado	P1, P2, P6, P11.
$2,25 < x \leq 3,00$	Alto	P8.
$3,00 < x \leq 3,75$	Crítico	

Fonte: Autor (2013).

A árvore de falhas foi construída considerando três níveis de eventos (Figura 4.7), sendo definido como evento topo da árvore, a não conformidade no ponto, representado por (A). Os eventos intermediários se referem a não conformidade com os indicadores sentinelas, Turbidez > 5,0 UT (B); CRL > 2,0 mg/L (C); CRL < 0,2 mg/L (D).

As possíveis falhas básicas causadoras dos eventos intermediários e, conseqüentemente, do evento topo foram ligadas a um conjunto de falhas mais amplo que envolve falha na operação, falha na manutenção e idade e material dos componentes do sistema de abastecimento.

A árvore foi planejada e discutida baseando-se nas características do sistema de abastecimento de Campina Grande e dos pontos críticos apontados pelo FMEA. A probabilidade de não conformidade nos pontos classificados como de alto risco (P8, P11 e P12) em comparação aos demais pontos foi estimada de acordo com a Equação 4.1., em razão do número de ocorrências garantirem um espaço amostral significativo. Assim, a probabilidade de não conformidade nos pontos P8, P11 e P12 foram, respectivamente, 94,81%, 100% e 87,10%.

$$P(A) = \frac{P(B)+P(C)+P(D)}{\Omega} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Em que:

P(A) = Probabilidade de ocorrência do evento A (Não conformidade no ponto)

P(B) = Probabilidade de ocorrência do evento B (Turbidez > 5,0 UT)

P(C) = Probabilidade de ocorrência do evento C (CRL > 2,0 mg/L)

P(D) = Probabilidade de ocorrência do evento D (CRL < 0,2 mg/L)

Ω = Espaço amostral

As falhas definidas que podem acarretar o evento turbidez maior que 5,0 UT num determinado ponto da rede de distribuição são a turbidez elevada na saída da ETA, a distância entre o ponto e o reservatório de distribuição, a baixa pressão na rede ou a formação de biofilmes.

A distância entre o ponto e o reservatório contribui para a não conformidade da turbidez, do mesmo modo que contribui para não conformidade do cloro residual livre, sendo uma falha operacional. Pontos mais distantes do reservatório tendem a acumular mais sedimentos ao longo da rede e apresentar maior decaimento do CRL, causado pela oxidação de substâncias redutoras e pelo tempo de residência do cloro na rede, quando comparado a pontos que estejam mais próximos do reservatório.

Da mesma forma, a baixa pressão na rede pode levar a uma maior estagnação da água, criando tempos longos de residência e setores nos quais podem ser acumulados sedimentos.

O evento CRL menor que 0,2 mg/L é causado, geralmente, por falhas como distância entre o ponto e o reservatório, perda de residual no reservatório, baixa pressão na rede, substâncias redutoras presentes na água ou formação de biofilmes nas tubulações.

A perda de residual de cloro no reservatório de distribuição é uma falha que, também, favorece a diminuição da concentração do residual de cloro no ponto, provocada, geralmente, pela falta de limpeza dos reservatórios e, conseqüentemente, presença de sedimentos e substâncias em seu interior que reduzem o cloro, sendo caracterizada como uma falha de manutenção e de idade e material dos componentes do sistema. Visto que, os materiais usados, em geral, nas juntas das tubulações e na vedação de roscas devem ser considerados como possíveis locais para colonização microbiológica, formação de biofilme e aumentar o consumo de cloro na rede de distribuição.

Substâncias redutoras da concentração de cloro presentes na água podem ser provenientes de falha na operação (processo de filtração), falhas na manutenção ou da idade e material dos componentes. Tubulações com manutenção deficiente, idade e materiais comprometidos provocam um consumo maior de cloro pela existência destas substâncias que são, comumente, amônia, ferro, manganês, sulfatos e matéria orgânica. Segundo Moreno (2009), verifica-se uma maior deterioração da qualidade da água em tubulações que estão em uso há mais tempo, tanto em termos microbiológicos como em termos químicos devido ao processo de corrosão e geração de produtos do metabolismo microbiano.

A aderência de microrganismos a superfícies sólidas está associada à deterioração das superfícies e/ou ambientes circundantes. Segundo Chaves (2004), os biofilmes são um

problema comum em tubulações que estão em serviço nas redes há mais de 10 anos. A formação dos biofilmes está relacionada tanto a falhas de manutenção como à idade e material das tubulações. A rugosidade das paredes dos tubos e juntas de conexões são os principais sítios de colonização microbiana. De acordo com Moreno (2009), a rugosidade absoluta equivalente (em mm) do cimento amianto é 0,025 a 0,05, do PVC é 0,0015 a 0,010 e do ferro galvanizado é 0,015 a 2,0.

O evento intermediário $CRL > 2,0$ mg/L é devido à supercloração na saída da ETA e à distância entre o ponto e o reservatório, sendo essas causas de caráter operacional. A supercloração é uma medida que, muitas vezes, é utilizada a fim de garantir uma concentração mínima do residual de cloro em todos os pontos da rede de distribuição, principalmente quando a rede é muito extensa e não apresenta pontos de recloração.

Na ETA de Gravatá foi frequentemente verificada por Leal (2012) a ocorrência da supercloração. Uma vez que no monitoramento realizado em 2011, a média do cloro residual livre na saída da ETA foi 4,02 mg/L, tendo 80% das amostras com concentrações de cloro que ultrapassaram o valor de 2,0 mg/L e 30% delas com valores maiores que o limite máximo permissível de 5,0 mg/L.

A turbidez elevada na saída da estação também é uma realidade do SACG, constatada por Leal (2012), que verificou uma média de 3,79 UT no período de março a outubro de 2011. Essa falha pode afetar todos os pontos analisados, em alguns mais do que outros, principalmente quando associada às demais falhas expostas na árvore.

A distância entre o ponto e o reservatório de distribuição é uma falha que, por si só, compromete o sistema de distribuição. E quando associada a falhas relacionadas ao estado das tubulações aumentam as não conformidades nos pontos de distribuição. Pontos próximos ao reservatório, geralmente, apresentam elevada concentração de cloro residual livre e baixa turbidez, enquanto pontos mais distantes apresentam baixa concentração de CRL e elevada turbidez. No entanto, o ponto P12 localiza-se próximo ao reservatório (R-9) e apresentou turbidez elevada. Pelo fato de que a água que abastece o R-9 chega sob alta pressão e o reservatório funciona como dispositivo de descompressão, sendo o efeito da turbulência também justificativa para os valores de turbidez no ponto P12. Distintamente ao que ocorre em outros pontos mais distantes do reservatório de distribuição, onde a turbidez é elevada, gradativamente ao longo da rede, pela presença de sedimentos procedentes das tubulações.

A baixa pressão na rede de distribuição de Campina Grande representa uma falha tanto de operação como de manutenção, visto que no período de 17h às 21h, trabalham-se com o mínimo de bombeamento para economizar energia, causando uma variação de nível no

reservatório e, portanto, uma redução na vazão. E se sobrepondo a isso, ainda houver o descuido com a manutenção da rede, o ambiente se torna mais propício ao aumento da turbidez e diminuição das concentrações dos residuais de cloro.

Leal (2012) constatou no monitoramento realizado nas três adutoras (DN 500 mm, DN 700 mm e DN 800 mm) que transportam água tratada para o R-9 e o R-5, um decaimento do cloro na chegada do reservatório de 32% a 50%, atribuído a esta interrupção ou redução no bombeamento, sendo esse decaimento mais expressivo na adutora, DN 800 mm onde o funcionamento é interrompido totalmente durante determinado período do dia.

Leal (2012) observou um decaimento nas concentrações residuais de cloro no interior dos reservatórios que podem ser associados à manutenção dos reservatórios, como também ao estado de conservação dos reservatórios, principalmente paredes e cobertura. Embora ocorra tal decaimento, persistem valores elevados de cloro residual. O reservatório R-5, apresentou uma média de 2,38 mg/L, com 65% das amostras acima do valor máximo de 2,0 mg/L para a rede de distribuição recomendado pela Portaria.

Diversas características relacionadas à tubulação da rede como rugosidade, vida útil, comprimento e diâmetro estão diretamente ligadas à qualidade da água. Os pontos de distribuição com maior decaimento de cloro, P8 e P11, são localizados no Bairro São José.

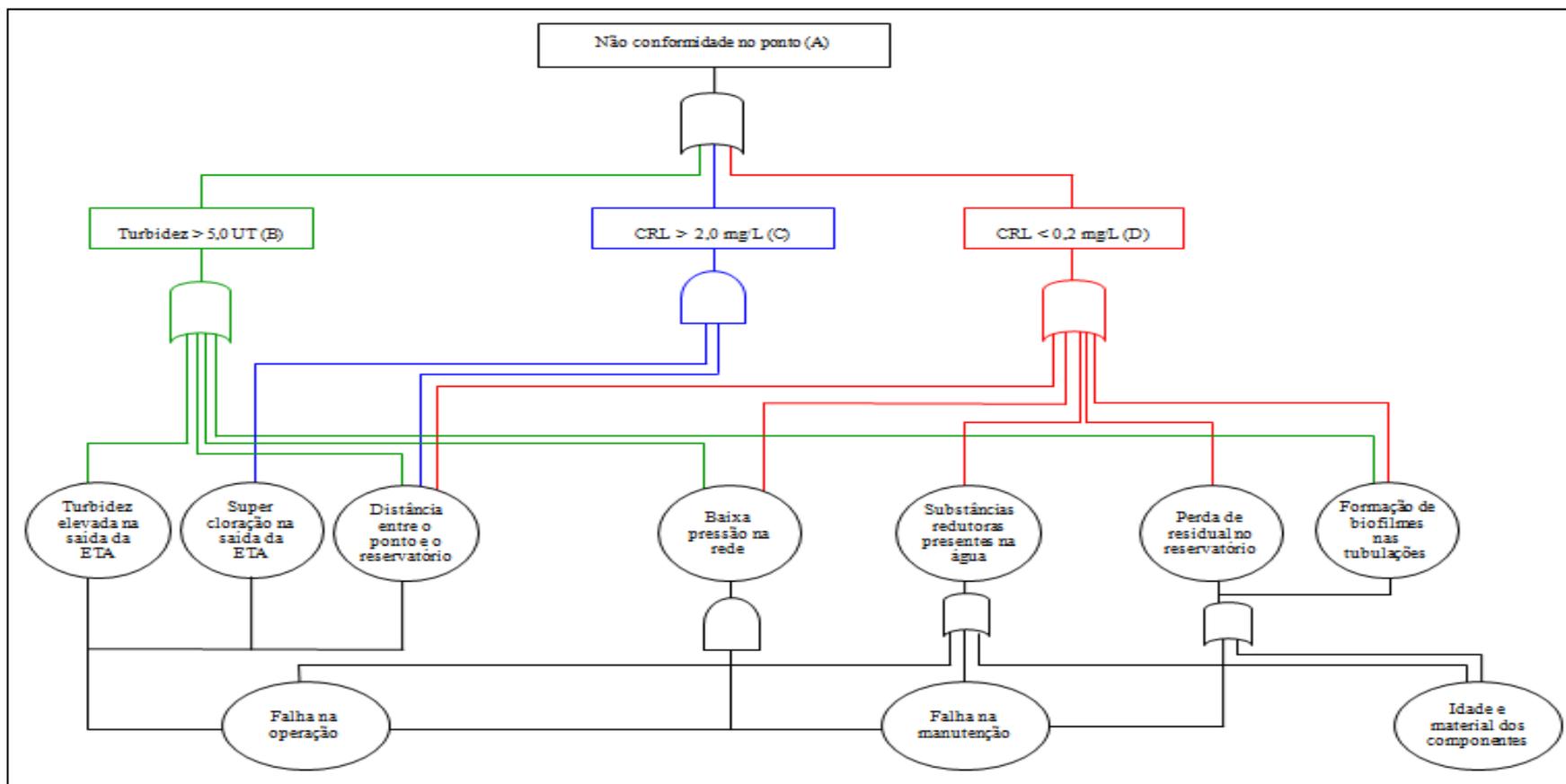
Segundo informações obtidas na CAGEPA, todo o bairro é abastecido pelo reservatório R-5. As tubulações de cimento amianto caíram em desuso dado à natureza cancerígena do amianto. Sarzedas (2009) comenta que, desde 1987, a maioria das novas tubulações tem sido fabricada utilizando diferentes tipos de materiais plásticos, como polietileno ou PVC.

Segundo Herz (1998), a vida útil do cimento amianto é de 40 a 70 anos e em tubulações de pequenos diâmetros, inferiores a 75 mm, o decaimento de cloro é mais pronunciado, devido ao aumento da absorção do cloro através do contato com a biomassa. As tubulações que transportam água para o P8 e P11 possuem diâmetro de 50 mm e as mais antigas estão em funcionamento há mais de 70 anos. Essas características associadas às falhas na manutenção potencializam a presença de substâncias redutoras na água, bem como a formação de biofilmes nas tubulações.

As falhas básicas não podem ser quantificadas, em razão da necessidade de maiores informações referentes ao sistema de abastecimento como cadastro técnico da rede de distribuição, boletim de atendimento ao consumidor, relatórios de consertos, rompimentos e vazamentos na rede que dariam subsídios para estimar a probabilidade que cada falha teria

para a não conformidade em cada ponto. Portanto, é possível avaliar quais as falhas são mais preocupantes e como elas influenciam na qualidade do produto final, a água distribuída.

Figura 4.7 – Árvore de falhas do SACG, considerando somente os indicadores sentinelas



Nota: As linhas da árvore não se cruzam.

Fonte: Autor (2013).

5 CONCLUSÃO

Pode-se considerar que foi alcançado, com o presente trabalho, o objetivo geral de analisar, de forma consolidada, o sistema de abastecimento de água de Campina Grande, como também analisar os pontos mais susceptíveis a não conformidade com o padrão de potabilidade.

O sistema de abastecimento de Campina Grande, embora empregue a supercloração na estação de tratamento, apresenta pontos na rede de distribuição com concentrações de cloro residual inferiores ao permitido pela Portaria MS 2914/2011, o que aponta a vulnerabilidade sanitária da água servida.

Através deste trabalho de pesquisa, foi firmada a importância dos indicadores sentinelas na avaliação precoce, eficaz e de baixo custo da qualidade da água de abastecimento, como também foi verificada a contribuição do acompanhamento sistemático desenvolvido pelo Projeto de Pesquisa Levantamento de Indicadores Sentinelas para a vigilância da qualidade da água de abastecimento de Campina Grande (PB).

As metodologias de avaliação de risco (FMEA e Árvore de Falhas) utilizadas no trabalho atenderam aos objetivos, quando aplicadas ao monitoramento da qualidade da água de abastecimento.

A metodologia FMEA, inicialmente, utilizada para os indicadores CRL, turbidez e pH, atenuou os riscos em determinados pontos que apresentaram grande número de não conformidades, devido à frequente conformidade do pH interferir na quantificação dos riscos. O ponto P11, por exemplo, apresentou ausência de cloro residual livre em todas as amostras analisadas. No entanto, seu risco foi classificado como moderado.

A ponderação e classificação dos riscos, nessa pesquisa, mostraram-se mais representativas a partir do momento em que foram utilizados apenas os indicadores sentinelas, CRL e turbidez. A partir daí, três pontos foram classificados como pontos de alto risco, o ponto que apresentou todas as amostras com ausência de CRL (P11), o ponto que teve 94,8% das amostras com concentrações de CRL inferiores a 0,2 mg/L (P8) e o ponto que 61,3% das amostras apresentaram concentrações de CRL superiores a 2,0 mg/L e 25,8% de amostras com turbidez superior a 5,0 UT. O que ratifica a utilização dos indicadores sentinelas no monitoramento da qualidade de água em sistemas de abastecimento.

6 RECOMENDAÇÕES

Diante dos resultados obtidos com a pesquisa, é recomendável a contínua vigilância da qualidade da água. Em especial nos pontos localizados na E.E.E.F.M Clementino Procópio e no Hospital Universitário Alcides Carneiro, por apresentarem maior vulnerabilidade sanitária.

Sugere-se a continuidade e aprofundamento no que se refere ao estudo do sistema de abastecimento de Campina Grande, principalmente a rede de distribuição para apurar quais fatores estão interferindo na qualidade da água em determinados pontos.

Como também a utilização de técnicas de avaliação de risco como instrumentos facilitadores nas ações do controle da qualidade ambiental, até mesmo com o uso de outros parâmetros de qualidade da água com Ferro, Alumínio, Trihalometanos (THM), bactérias termotolerantes, entre outros.

REFERÊNCIAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das águas do Estado da Paraíba. **Monitoramento: últimas informações recebidas sobre os volumes dos 121 reservatórios d'água da Paraíba monitorados pela AESA.** Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/>>. Acesso em janeiro de 2013.

ALBUQUERQUE, A. A. **Análises e Métodos de Otimização para Eficiência Energética de Estações Elevatórias em Sistemas de Abastecimento de Água.** 2007. 113p. Tese (Doutorado Temático em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2007.

APHA, AWWA, WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 20th ed., Washington, D.C: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 1999.

ARAÚJO, M. C. S. P. de. **Indicadores de Vigilância da Qualidade da Água de Abastecimento da Cidade de Areia (PB).** 2010. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2010.

BARBOSA, F. L.. **Avaliação da qualidade da água consumida em um hospital público da cidade de Campina Grande – PB.** 2010, 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2010.

CARMO, R. F.; BEVILACQUA, P. D.; BASTOS, R. K. X. Vigilância da qualidade da água para consumo humano: abordagem qualitativa da identificação de perigos. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, vol. 13, 2008. Disponível em:<<http://www.scielo.br/pdf/esa/v13n4/a11v13n4.pdf>>. Acesso em: 26 de setembro de 2012.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Boas práticas no abastecimento de água:** procedimentos para a minimização de riscos à saúde. Brasília: Ministério da Saúde, 2006a. 252p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano.** Brasília: Ministério da Saúde, 2006b. 212 p

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Diretriz nacional do plano de amostragem da vigilância em saúde ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano.** Brasília: Ministério da Saúde, 2006c. 60p.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento.** 3. ed. rev. - Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006d.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria n.º 2914, 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://www.comitepcj.sp.gov.br/download/Portaria_MS_2914-11.pdf> Acesso em 06 de outubro de 2012.

CARNEIRO, F. C. S. **Avaliação de riscos: Aplicação a um processo de construção.** 2011. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro, Portugal, 2011.

CEBALLOS, B. S. O. Microbiologia Sanitária e Ambiental. In: Sergio Rolim Mendonça (org.). **Sistemas de Lagunas de Estabilización.** Como Utilizar Aguas Residuales Tratadas en Sistemas de Regadío. Editora: McGraw Hill/Acodal., 2000.

CHAVES, L. C. D. **Estudo da cinética de formação de biofilmes em superfícies em contacto com água potável.** 2004. 186p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia do Ambiente), Portugal, 2004.

DANIEL, L. A. **Processos de Desinfecção e Desinfetantes Alternativos na Produção de Água Potável.** Prosab: São Carlos, 2001.

FREITAS, M. B.; FREITAS, C. M. A. **Vigilância da qualidade da água para consumo humano – Desafios e Perspectivas para o Sistema Único de Saúde.** Ciência e Saúde Coletiva, vol. 10, n. 4, p. 993-1004, 2005.

GALDINO, F. A. G. **Indicadores sentinelas para a formulação de um plano de amostragem de vigilância da qualidade da água de abastecimento de Campina Grande (PB).** 2009. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2009.

HERZ, R. **Exploring rehabilitation needs and strategies for water distribution networks.** Aqua. 1998. Vol.47. n.6.

IBGE. **Abrangência dos serviços de Saneamento.** In: **Atlas do Saneamento 2011.** Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/default_zip.shtm Acesso em 15 de dezembro de 2012.

IBGE. **IBGE CIDADES.** Disponível em : < <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>> Acesso em 15 de dezembro de 2012.

KALMAZ, E. V.; KALMAZ, G. D. The health effects and ecological significance of chlorine residual in water. **Chemosphere**, Great Britain, v. 10, n. 10, p. 1163-1175, 1981.

LEAL, E. S. **Modelagem da degradação de cloro residual livre em sistemas de adução de água de abastecimento de porte médio.** 2012. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2012.

LENZI, Ervim. **Introdução a química da água: ciência, vida e sobrevivência.** 1ª.ed. Rio de Janeiro: LTC Editora S/A, 2009.632p.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** 2ª ed.São Paulo: Átomo, 2008. 444p.

MENESES, R. A, **Diagnóstico operacional de sistemas de abastecimento de água: o caso de Campina Grande.** 2011. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2011.

NASCIMENTO, R.S & OLIVEIRA, R. **Capítulo 4 - Avaliação de Risco**. Aula proferida na Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Campina Grande, 2011.

MORENO, J. **Avaliação e gestão de riscos no controle da qualidade da água em redes de distribuição: estudo de caso**. 2009. 617p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

OGATA, I. S. **Avaliação de risco da qualidade da água potável do sistema de abastecimento da cidade de Campina Grande (PB)**. 2011. 69p. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Estadual da Paraíba. Paraíba, 2011.

SARZEDAS, G. L. **Planejamento para a substituição de tubulações em sistemas de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo**. 2009. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

SILVA; S. A.; OLIVEIRA, R. **Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias**. Campina Grande: O Autor, 2001. 266p.

SOKAL, R. R.; ROHLF, F. S. **Biometry**. 4 ed. New York. W. H. Freeman and Company, 1995. 850p.

SOUZA, C. R. C. **Análise e gerenciamento de riscos de processos industriais**. Disponível em <http://www.segurancaotrabalho.eng.br/download/Apostila_de_Gerenciamento_de_Riscos.pdf>. Acesso em 29 de novembro de 2012.

SUCENA. M. P. **Módulo 6. Árvore de Falhas**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www.sucena.eng.br/IME/Mod6_ArvoreFalhas2008.pdf> Acesso em 08 de novembro de 2012.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológicos de águas residuárias: introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Vol.1. 3ª ed. Belo Horizonte: UFMG; 2005.

ANEXO A – Valores críticos para testar *Outliers* (Para o Método de Grubbs)

179

TABLE DD Critical values for testing outliers (according to Grubbs)

<i>n</i>	α				
	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005
3	1.148	1.153	1.155	1.155	1.155
4	1.425	1.463	1.481	1.492	1.496
5	1.602	1.672	1.715	1.749	1.764
6	1.729	1.822	1.887	1.944	1.973
7	1.828	1.938	2.020	2.097	2.139
8	1.909	2.032	2.126	2.221	2.274
9	1.977	2.110	2.215	2.323	2.387
10	2.036	2.176	2.290	2.410	2.482
11	2.088	2.234	2.355	2.485	2.564
12	2.134	2.285	2.412	2.550	2.636
13	2.175	2.331	2.462	2.607	2.699
14	2.213	2.371	2.507	2.659	2.755
15	2.247	2.409	2.549	2.705	2.806
16	2.279	2.443	2.585	2.747	2.852
17	2.309	2.475	2.620	2.785	2.894
18	2.335	2.504	2.651	2.821	2.932
19	2.361	2.532	2.681	2.854	2.968
20	2.385	2.557	2.709	2.884	3.001
21	2.408	2.580	2.733	2.912	3.031
22	2.429	2.603	2.758	2.939	3.060
23	2.448	2.624	2.781	2.963	3.087
24	2.467	2.644	2.802	2.987	3.112
25	2.486	2.663	2.822	3.009	3.135
26	2.502	2.681	2.841	3.029	3.157
27	2.519	2.698	2.859	3.049	3.178
28	2.534	2.714	2.876	3.068	3.199
29	2.549	2.730	2.893	3.085	3.218
30	2.563	2.745	2.908	3.103	3.236
31	2.577	2.759	2.924	3.119	3.253
32	2.591	2.773	2.938	3.135	3.270
33	2.604	2.786	2.952	3.150	3.286
34	2.616	2.799	2.965	3.164	3.301
35	2.628	2.811	2.979	3.178	3.316
36	2.639	2.823	2.991	3.191	3.330
37	2.650	2.835	3.003	3.204	3.343
38	2.661	2.846	3.014	3.216	3.356
39	2.671	2.857	3.025	3.228	3.369
40	2.682	2.866	3.036	3.240	3.381
50	2.768	2.956	3.128	3.336	3.483
60	2.837	3.025	3.199	3.411	3.560
70	2.893	3.082	3.257	3.471	3.622
80	2.940	3.130	3.305	3.521	3.673
90	2.981	3.171	3.347	3.563	3.716
100	3.017	3.207	3.383	3.600	3.754
110	3.049	3.239	3.415	3.632	3.787
120	3.078	3.267	3.444	3.662	3.817
130	3.104	3.294	3.470	3.688	3.843
140	3.129	3.318	3.493	3.712	3.867

Fonte: SOKAL & ROHLF (1995).