



Universidade Federal de Ouro Preto  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental  
Mestrado em Engenharia Ambiental

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE INDICADORES DE DESEMPENHO  
OPERACIONAL DE ESTAÇÕES CONVENCIONAIS DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

**Luciano Gomes Pereira**

**Ouro Preto  
2016**



Universidade Federal de Ouro Preto  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental  
Mestrado em Engenharia Ambiental

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE INDICADORES DE DESEMPENHO  
OPERACIONAL DE ESTAÇÕES CONVENCIONAIS DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título: Mestre em Engenharia Ambiental – Área de Concentração: Tecnologias Ambientais.

**Orientador Prof. Dr. Marcelo Libânio**  
**Coorientadora Prof. Dr. Gilmare Antônia da Silva**

**Ouro Preto, MG.**

**2016**

P436d

Pereira, Luciano Gomes.

Desenvolvimento de sistema de indicadores de desempenho operacional de estações convencionais de tratamento de água [manuscrito] / Luciano Gomes Pereira. - 2016.

X, 117f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Libânio.

Coorientadora: Profa. Dra. Gilmare Antônia da Silva.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental .

Área de Concentração: Tecnologias Ambientais.

1. Indicadores ambientais. 2. Água - Estações de tratamento. 3. Abastecimento de água nas cidades. 4. Saneamento. I. Libânio, Marcelo. II. Silva, Gilmare Antônia da. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 628.1

Catálogo: [www.sisbin.ufop.br](http://www.sisbin.ufop.br)



UFOP  
Universidade Federal  
de Ouro Preto

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PROAMB



*Desenvolvimento de sistema de indicadores de desempenho operacional de estações convencionais de tratamento de água*

Autor: Luciano Gomes Pereira

Dissertação defendida e aprovada, em 17 de junho de 2016, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Professor Dr. Marcelo Libânio - Orientador  
Universidade Federal de Minas Gerais

Professora Dra. Gilmore Antônia da Silva - Coorientadora  
Universidade Federal de Ouro Preto

Professor Dr. Valter Lúcio de Pádua  
Universidade Federal de Minas Gerais

Professor Dr. Alberto de Freitas Castro Fonseca  
Universidade Federal de Ouro Preto

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que tanto carinho tem comigo, capacita-me todos os dias da minha vida e coloca em minha companhia pessoas que se importam em fazer as coisas certas.

Ao meu querido Pai, que no abraço de Deus me vigia, se divertindo com meus tropeços, atropelos e vitórias, intercede e abençoa-me para que eu seja um homem bom como ele foi.

À minha querida Mãe que nunca me abandona e é meu alicerce.

À Flaviane, pois não há quem tenha incentivado mais a mim para candidatar-me ao título de Mestre e por incentivar também no decorrer da construção desta pesquisa.

Ao Prof. Marcelo Libânio e à Prof. Gilmar Antônia da Silva, pela orientação e coorientação respectivamente, sempre com zelo e paciência, e por toda a experiência e tempo colocados à disposição.

Aos críticos, Prof. Alberto Fonseca e Prof. Aníbal da Fonseca Santiago. As críticas foram essenciais para a qualificação e construção do trabalho, além de constituírem-se como valioso aprendizado para vida.

À direção do Serviço Municipal de Água e Esgoto de Ouro Preto, pelo interesse na pesquisa e por permitir que eu dividisse o tempo entre o trabalho de Engenheiro Civil e o mestrado.

Ao PROAMB, na pessoa dos Professores Mônica Cristina Teixeira e Versiane Albis Leão, à Vânia e aos demais professores desse programa de mestrado de grande importância na área da Engenharia Sanitária e Ambiental e que se dedica à proposição de soluções e alternativas para melhoria das condições ambientais.

*“O sábio das coisas simples olhou em torno e disse: não há profundidade sem superfície. É preciso dizer bom dia quando o dia anoitece. Ser exato todo dia envelhece. ”*

**(Luís Veiga Leitão)**

*“Não fiques em terreno plano. Não subas muito alto. O mais belo olhar sobre o mundo está à meia encosta. ”*

**(Friedrich Nietzsche)**

## RESUMO

As estações convencionais de tratamento de água podem ter limites operacionais além do previsto no projeto quanto à vazão afluente. A constatação de parâmetros de potabilidade dentro do padrão em relatórios de monitoramento de estações de tratamento que operaram com vazões acima da projetada sustenta esta afirmação, sendo que o sucesso do tratamento está atrelado não somente à capacidade hidráulica, mas também à operacionalização adequada, às características e ao estado geral das unidades de tratamento.

O resultado do desempenho no decorrer do tratamento convencional, barreira que contribui para o enquadramento da qualidade da água para consumo humano a partir das unidades que o compõem (mistura rápida, floculador, decantador, filtro e tanque de contato), constitui importante informação sobre a operação das estações projetadas com base nessa tecnologia e tornaram-se objeto desta pesquisa.

O principal objetivo para a abordagem ora apresentada foi desenvolver sistema de indicadores de desempenho de estações convencionais de tratamento de água a partir da visão do prestador de serviço. A metodologia usada consistiu em quatro etapas principais: (i) definição dos indicadores e justificativa; (ii) formulação e aplicação do sistema de indicadores a um conjunto de cinco pequenas estações (vazões nominais entre 20 e 60 l/s); (iii) hierarquização das estações amostradas e (iv) análise estatística a partir dos resultados de cálculo dos indicadores.

A entrada para o cálculo dos indicadores foram os dados de monitoramento operacional diário das estações de tratamento de água amostradas referentes aos anos de 2011 e 2012 e a saída foram os índices que demonstraram o desempenho das estações: *IDO – Índice de Desempenho Operacional*, obtido através dos *IR – Indicadores de Resultado* e *ISO – Índice de Sobrecarga Operacional*, obtido através dos *IC – Indicadores de Causa*. Trata-se de uma composição de sistema de indicadores inédita.

O sistema com 13 indicadores foi proposto e aplicado para avaliação de desempenho de estações convencionais de tratamento de água de pequeno porte. A aplicação possibilitou a hierarquização das estações e avaliação do resultado no decorrer do tratamento.

## ABSTRACT

Conventional water treatment plants may present operational limits over the flow rate projected. Potability parameters according standards when the flow rate is higher than projected allows this conclusion. Moreover, the success of treatment is associated with suitable operation, characteristics of equipments and physical conditions of the plants.

The performance throughout the multiple steps which comprising conventional treatment (rapid mixing, flocculation, clarification, filtration and disinfection) constitutes relevant information about conventional water treatment plants operation and it became subject of this research.

The main objective of the research was to develop and apply performance indicators (PI) system for the assessment of conventional water treatment plants under the service provider perspective. The methodology used consisted in four main steps: (i) definition and justification; (ii) formulation and application of the developed system to evaluate five small size plants (inflow rate from 20 to 60 L.s-1); (iii) development of plants hierarchy (iv) statistical analysis based on the indicators results.

The input for calculations was the operational monitoring dataset of water treatment plants years 2011 and 2012. The output were indexes, which demonstrated the performance: *OPI - Operational Performance Index* obtained by summation of the *RI - Results Indicators* and *OOI - Operational Overload Index*, obtained by summation of the *CI - Cause Indicators*.

Thus, it was proposed a Performance Indicators (PI) system with 13 indicators to assess conventional water treatment plants. In this case, the application was for small WTPs. The application shows the ranking of water treatment plants and allows assessment throughout multiple steps of treatment.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Plano de amostragem para determinação dos períodos com dados válidos.....	32
Figura 2: Verificação de sobrecarga da ETA I para máxima vazão afluyente .....	42
Figura 3: Verificação de sobrecarga da ETAII para máxima vazão afluyente.....	42
Figura 4: Verificação de sobrecarga da ETA III para máxima vazão afluyente .....	43
Figura 5: Verificação de sobrecarga da ETA IV para máxima vazão afluyente .....	43
Figura 6: Verificação de sobrecarga da ETA V para máxima vazão afluyente .....	44
Figura 7: Análise de componentes principais - indicadores .....	74

## LISTA DE QUADRO E TABELAS

Quadro 1: Equações para o cálculo dos indicadores propostos.....	65
Tabela 1: Características de projeto das estações de tratamento amostradas .....	40
Tabela 2: Dados gerais de 2011 e 2012 agrupados. ....	58
Tabela 3: Atribuição de pesos aos indicadores.....	63
Tabela 4: Resultado de cálculo dos indicadores.....	66
Tabela 5: Coeficiente de correlação de Spearman Rank para os indicadores .....	67
Tabela 6: Hierarquização segundo os Indicadores de Resultado considerando os pesos.....	69
Tabela 7: Hierarquização segundo os Indicadores de Causa considerando os pesos.....	70
Tabela 8: Hierarquização segundo IR03 – percentual de amostras com turbidez da água tratada inferior a 0,5uT .....	71
Tabela 9: Hierarquização das estações a partir dos Indicadores de Resultados sem atribuição de pesos .....	71
Tabela 10: Hierarquização segundo os Indicadores de Causa sem atribuição de pesos .....	72
Tabela 11: Hierarquização segundo IC02 - Razão entre a mediana das taxas de filtração reais e a taxa de filtração de norma - NBR 12216.....	72
Tabela 12: Hierarquização segundo IC04 - Razão entre a mediana da turbidez decantada e mediana da turbidez tratada.....	72

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	8
2.1	Objetivo Geral.....	8
2.2	Objetivos Específicos .....	8
3.	REVISÃO DA LITERATURA .....	9
3.1	Evolução do tratamento de água .....	10
3.1.1	Contextualização .....	10
3.1.2	Adventos tecnológicos.....	13
3.1.3	Importância da turbidez no desempenho das estações .....	15
3.1.4	Controle e qualidade.....	16
3.1.5	Aplicação de indicadores e índices em gestão.....	17
3.1.6	Dimensionamento das unidades de tratamento – NBR 12216 .....	19
3.2	Relevância da avaliação de desempenho de ETA.....	21
3.2.1	Abordagens para avaliação de desempenho de ETA.....	22
3.2.2	Relação entre desempenho e gestão .....	28
4.	METODOLOGIA.....	30
4.1	Obtenção de indicadores - Definição.....	31
4.2	Análise de consistência dos dados .....	32
4.2.1	Análise Interquartil.....	33
4.2.2	Análise de distribuição dos dados .....	34
4.2.3	Análise de componentes principais dos dados .....	35
4.3	Cálculo e análises dos indicadores propostos .....	36
5.	DISCUSSÃO E RESULTADOS .....	40
5.1	Caracterização das estações de tratamento de água.....	40
5.2	Definição e justificativa dos indicadores .....	44
5.3	Consistência dos dados .....	57
5.4	Aplicação dos indicadores .....	62
5.5	Aplicação da ACP ao sistema de indicadores proposto.....	73
6.	CONCLUSÕES .....	78
7.	REFERÊNCIAS .....	81
8.	ANEXOS.....	85

## 1. INTRODUÇÃO

Este é um trabalho que se enquadra na grande área da Engenharia Sanitária e Ambiental, subárea saneamento básico particularmente no eixo abastecimento público de água. O interesse é o desempenho das estações de tratamento de água consideradas barreiras fundamentais para garantir a produção de água segura para o consumo humano. É primordial a execução de ações efetivas para melhoria do desempenho dessas estações (OLIVEIRA, Mariângela de, 2014) também definidas como conjunto de unidades que adequam as características naturais da água aos padrões de potabilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992).

Lopes e Libânio (2005) exemplificaram que estações de tratamento de água construídas no Brasil na década de 70 trabalharam com sobrecarga e produziram água com qualidade abaixo da esperada para o tipo de tratamento implantado. Embora no país nos últimos dez anos tenham ocorrido evoluções na área de saneamento não é possível garantir que todas essas estações de tratamento estejam em situação favorável de operação e estrutura física.

No trabalho presente são propostos indicadores para averiguar as condições operacionais de estações de tratamento de água que são exemplos do cenário mencionado por Lopes e Libânio (2005) e os fatores que interferem no desempenho delas quanto ao atendimento dos padrões: turbidez; cor aparente e coliformes totais; itens de grande relevância destacados na Portaria 2914/2011 (BRASIL, 2011).

As estações convencionais de tratamento de água podem ter limites operacionais além do previsto no projeto quanto à vazão afluente, entretanto é importante que a operacionalização seja adequada e podem ser necessárias intervenções para que haja sucesso do tratamento em situações de operação além da capacidade projetada. Isso significa aproximar as estações dos limites operacionais reais.

Em contrapartida, existem limitações para adequação da operacionalização ou para promover as intervenções nas estações de tratamento. Lopes e Libânio (2005) afirmaram que as ampliações e atualizações necessárias nem sempre são feitas devido à escassez de recursos, principalmente financeiro, ou alocação inadequada dos recursos disponíveis, sejam técnicos ou financeiros, o que contribui para um desempenho insatisfatório.

Cabe expressar que as atualizações necessárias, antes da questão de recursos, passam pela solução técnica e definição de prioridades. Como os sistemas de abastecimento público, inclusive as

estações de tratamento, são vistos de forma superficial sem avaliação adequada, torna-se difícil perceber que parcela importante das atualizações necessárias pode ser resolvida com medidas que não demandam grandes investimentos.

Um fator que requer atenção na avaliação de desempenho é a grande quantidade de variáveis e a natureza particular de cada uma delas que influenciaram a concepção e o projeto das estações de tratamento e acabam por condicionar também a operação, devido a isso, a própria norma NBR 12216 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) prevê duas alternativas para aplicação no trabalho de dimensionamento.

Cabe identificar que a variabilidade de condições a qual a estação de tratamento de água está submetida não é totalmente previsível e dificulta ajustar os projetos. Esta variabilidade é denotada por variáveis hidráulicas, qualidade da água bruta e variáveis operacionais. É difícil concluir sobre todas as possibilidades de resultado das interações entre elas.

Na fase de concepção e anteprojeto a NBR 12216 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) recomenda como primeira alternativa que os parâmetros de projeto estejam pré-definidos por meio de ensaios, quanto a isso há convicção de que não foi aplicada esta alternativa na totalidade dos projetos até então executados. Sendo assim, por outro lado como segunda alternativa, na impossibilidade de execução de ensaios, a NBR 12216 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) recomenda uso de faixas de trabalho adotadas por convenção para o dimensionamento das unidades de tratamento.

De um modo geral o dimensionamento das estações de tratamento de água é fundamentado em parâmetros hidráulicos, sendo que a aplicação da segunda alternativa é ainda mais afim aos requisitos hidráulicos. Como cada estação está submetida a condições operacionais e de qualidade de água afluentes particulares a cada caso, é adequado afirmar que seja possível estabelecer os limites operacionais, ou, o desempenho máximo das estações, somente monitorando rotineiramente as condições reais com auxílio de ferramentas de avaliação de desempenho no decorrer dos períodos de operação da estação, ressaltando ainda a importância do uso de instrumentos de previsão de desempenho (*Jar Test*).

Assim sendo, é importante refletir sobre o dimensionamento das estações e buscar projetar ferramentas para identificação de deficiências estruturais e desajustes nos procedimentos operacionais adotados que interferem no desempenho quanto ao atendimento dos padrões de

potabilidade para a água tratada. No Brasil os padrões se encontram estabelecidos na Portaria 2914/2011(BRASIL, 2011).

A visão superficial sem avaliação adequada induz a conclusões não específicas sem riqueza de detalhes e, por isso, são produzidos relatórios técnicos que registram gravidade de situação potencializada pela carência de objetividade. Então, é pretendido, a partir aplicação do sistema de indicadores, verificar se há necessidade generalizada de ampliação das estações de tratamento de água em operação ou se as mesmas comportam capacidade de produção de água maior que a nominal com qualidade de acordo com a requerida.

A realização de ensaios leva a dimensionar de forma mais precisa e a aplicação de parâmetros usuais implica certa subjetividade ou generalização que levariam ao superdimensionamento. Não foram obtidas informações de como as estações de tratamento de água amostradas neste trabalho foram dimensionadas, somente estiveram à disposição alguns desenhos e os registros da capacidade nominal nas placas de inauguração.

Considerando isso, abre-se a discussão sobre a capacidade produtiva das estações de tratamento amostradas sabendo que estão rotineiramente sujeitas a condições de operação além das nominais. O resultado do desempenho operacional pode demonstrar que ajustes, operacionais ou estruturais, podem ampliar os limites operacionais quanto à vazão e aumentar a robustez quanto à obtenção de água afluyente com qualidade.

Está em discussão, portanto, a dificuldade em estabelecer previamente a capacidade nominal das estações considerando os parâmetros hidráulicos e a qualidade da água bruta simultaneamente. O dimensionamento das estações tem peso significativo dos parâmetros hidráulicos. Sendo assim, as potencialidades e limitações das estações em operação devem ser avaliadas periodicamente e não está descartado que as estações podem ter sucesso no atendimento dos padrões de potabilidade mesmo submetidas a condições que extrapolem sua capacidade nominal atestada em projeto, ou seja, condições de sobrecarga operacional.

Ressalta-se que a preocupação mundial é crescente com a potabilidade das águas de abastecimento. A detecção relativamente recente de concentrações de agentes como fármacos e trihalometanos – identificados a partir dos anos 1970 – e os casos de contaminação por cistos e oocistos de protozoários têm provocado um rigor cada vez maior para os limites máximos ou mínimos dos valores dos parâmetros de qualidade de água monitorados nas estações de tratamento de água, ou

seja, ao discutir a capacidade produtiva os aspectos de atendimento da qualidade exigida não podem estar alheios.

O Brasil acompanha essa preocupação, pois a Portaria 2914 de dezembro de 2011 (BRASIL, 2011) implicou na revogação da Portaria 518 de 25 de março de 2004 e aumentou significativamente o rigor para os parâmetros de potabilidade. Estabelece, inclusive, padrões para substâncias químicas que representem risco à saúde em acréscimo relativo ao preconizado pela referida Portaria 518/2004.

Em acréscimo, as leis brasileiras pressionam a evolução dos serviços de saneamento preconizando a universalização do saneamento, conteúdo da *Lei Federal 11.445* (BRASIL, 2007). Porém, as perspectivas não têm sido favoráveis a partir de que os desafios decorrentes da escassez ou alocação ineficiente de recursos financeiros, logísticos e técnicos distanciam o país da capacidade de sanar a necessidade de melhoria exigida pelo rigor crescente e pode inviabilizar que os sistemas de abastecimento sejam confiáveis e suficientes para o atendimento pleno da população.

Dois são fatos possíveis: primeiro, existem no país estruturas bem consolidadas com previsões corretas de final de plano e que ainda não expiraram, e, segundo, exatamente o contrário caracterizando questão importante que envolve recursos limitados para ampliações, dificuldades de gestão, estudo da capacidade produtiva atual e, principalmente, consideração dos aspectos de qualidade. O segundo fato é a lacuna para aplicação da presente pesquisa.

A fim de explorar o potencial de difusão da aplicação do sistema de indicadores ora proposto, foram apanhadas informações sobre o cenário brasileiro de abastecimento de água dando atenção à característica do manancial que implica na definição do tipo de tratamento exigido, à quantidade de água distribuída e ao uso da tecnologia de tratamento convencional. Os dados mais recentes os quais puderam ser acessados foram publicados no ano de 2010.

De acordo com a Agência Nacional de Águas (2010), a partir de dados de 2008, dos 5565 municípios brasileiros 2614 têm aporte essencialmente de mananciais superficiais, 2153 de mananciais subterrâneos e 757 de mananciais subterrâneos e superficiais concomitantemente. Não consta informação dos 41 municípios restantes no atlas de saneamento produzido pela Agência Nacional de Águas.

A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010), ano referência 2008, indica que 3141 municípios brasileiros têm aporte de manancial superficial, 3545 de poços profundos, 688 municípios contam com poços rasos e 87 utilizam outros artifícios. Supõe-se que outros artifícios sejam cisternas, lagoas de grande extensão, captação de águas do mar ou sistemas de coleta e reservação de águas pluviais.

Há um agravante: à medida que os padrões de qualidade se tornam rigorosamente restritivos e que a qualidade das águas dos potenciais mananciais e dos mananciais em uso têm piorado, a adoção de estações simplificadas com processos única e exclusivamente de filtração e desinfecção perdem a aplicabilidade e há exigência de que sejam construídas estações mais robustas, por exemplo, estações convencionais de tratamento de água que contenham os processos de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção.

Toda água para abastecimento humano deve passar por processo de desinfecção, entretanto à medida que cresce a preocupação, inclusive com as águas subterrâneas nas quais vem sendo constatada contaminação por lixiviação de elementos antes não detectáveis, a adoção de processos mais completos para adequação da qualidade da água subterrânea, por exemplo, para abastecimento público, poderá se tornar tendência.

Em 2008 foi avaliado que eram distribuídos por dia 61.063.492 m<sup>3</sup> de água e cabe expressar que a demanda de água no Brasil é incisivamente crescente; no ano 2000 eram distribuídos 43.999.678 m<sup>3</sup> por dia (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010), ou seja, de 2000 a 2008 o volume de água distribuído cresceu 39%, para um aumento da população total da ordem de 11% e aumento da população abastecida de 22%; percentuais obtidos a partir do diagnóstico dos serviços de água e esgoto (SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, 2000; SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, 2010).

Tem-se que 2817 municípios brasileiros contam com estações convencionais de tratamento de água no seu sistema de abastecimento e essas estações têm produzido uma margem de 69,2% da água distribuída tratada no país, traduzido em números, 39.282.607 m<sup>3</sup>/dia avaliado em 2008 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010). Cabe ressaltar que essa vazão distribuída não traduz a população atendida por água produzida por tratamento convencional à medida que o consumo *per capita* e os percentuais de perda variam de sistema para sistema e,



por conseguinte, de município para município e de região para região, o que implica afirmar que qualquer pretensão de ratear esse volume para uma estimativa de população atendida incorreria numa tradução grosseira sem confiabilidade. Por outro lado, torna-se interessante olhar para estações de tratamento com a tecnologia mais difundida no país e que produzem um percentual tão significativo da água distribuída.

O cenário põe em destaque que estações convencionais de tratamento de água que operam com sobrecargas estão susceptíveis a variações da qualidade da água bruta e podem eventualmente serem aplicadas para tratamento de águas subterrâneas. Define-se tratamento tipo convencional como aquele em que a água bruta tem sua qualidade melhorada através dos processos e operações unitárias que envolvem a coagulação, floculação, decantação ou flotação, filtração e desinfecção eventualmente complementadas com correção de pH e fluoretação (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010; LIBÂNIO, 2005).

No momento persiste a realidade de recursos mal alocados ou limitados para investimento na melhoria dos sistemas de abastecimento público de água e de carência de diretrizes adequadas de gestão e operacionalização. Com a devida atenção à relevância dos aspectos de qualidade de água tratada, essas dificuldades podem ser superadas a partir da aplicação de indicadores que qualifiquem as estações a partir das características operacionais atuais e apontem ajustes, mais simples ou mais complexos, que contribuirão com melhoria contínua e conformidade no desempenho quanto à quantidade e qualidade da água produzida.

A motivação ambiental que se correlaciona com a presente pesquisa tem uma parcela na questão de saúde pública quanto ao atendimento pleno da população em quantidade e qualidade e outra parcela na diminuição de volume de recursos a serem aplicados e/ou alocação eficiente deles, o que incide no planejamento e na gestão do atendimento.

A partir da aplicação de indicadores não serão eliminadas as necessidades de ampliação ou de construção de novas estações de tratamento de água, até porque há localidades ainda não atendidas com tratamento adequado e para esses locais devem também ser direcionados recursos disponíveis (existem também questões geográficas a considerar). Entretanto, acredita-se que muitos sistemas podem ter gerenciamento melhor e avaliação adequada de modo a alcançar eficiência e eficácia.

Têm sido explorados inúmeros pontos de vista para proposição de sistemas de indicadores. Para este caso dispõe-se do ponto de vista do próprio prestador de serviço que opera os sistemas de

tratamento e abastecimento de água para apresentar as deficiências e projetar proposições de melhoria contínua no sentido de alcançar resultados satisfatórios.

A Agência Nacional de Águas (2010) divulgou que no Brasil 69% dos municípios tem os serviços de abastecimento de água prestados por companhias estaduais de saneamento, em 27% dos municípios a responsabilidade pelos serviços é de entidades municipais (serviços autônomos ou prefeituras) e em 4% dos municípios os serviços estão ao encargo de empresas do setor privado.

Por outro lado, o Diagnóstico de Saneamento (SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, 2014) com representatividade amostral de 98%, informa que os prestadores de serviços de abrangência regional (as denominadas companhias estaduais de saneamento) são responsáveis pelo atendimento de 77,9% dos municípios quanto ao abastecimento de água que em termos populacionais conferem a 74,0% do universo amostral (SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, 2014). Fica evidenciado que a operação dos sistemas de saneamento é predominantemente executada por companhias estaduais.

A ferramenta ora proposta fica disponibilizada para aplicação nas estações operadas pelas companhias estaduais, certamente interessadas nos aspectos de economia de insumos, promoção de melhoria contínua e alocação eficiente dos recursos. Não obstante, considerando a simplicidade e praticidade, fica também acessível aos serviços autônomos e prefeituras que operam seus sistemas de tratamento de água e que talvez mais precisem dessa visão simplificada por não contarem com especialistas no seu quadro efetivo de profissionais.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Propor sistema de indicadores relacionados às unidades de tratamento de água definidas na NBR 12216 que compõem a tecnologia de tratamento convencional para avaliação do desempenho operacional das estações projetadas adotando tal tecnologia.

### **2.2 Objetivos Específicos**

2.2.1. Caracterizar a especificidade técnica de cada indicador proposto;

2.2.2. Identificar a relevância e eventual sobreposição de indicadores no sistema proposto por meio da Análise de Componentes Principais;

2.2.3. Hierarquizar as estações convencionais de tratamento de água amostradas em relação ao resultado de desempenho.

### **3. REVISÃO DA LITERATURA**

As estações de tratamento de água são indispensáveis sendo importante que estejam funcionando em condições favoráveis para que haja sucesso no atendimento dos padrões de qualidade com mínimo possível de desperdício de insumos, de perdas de água tratada no sistema e de uso de água dos mananciais. Sob essa perspectiva é natural que os projetos e as gestões das estações de tratamento de água devam ser aprimorados visando eficiência e eficácia.

Um sistema de tratamento de água é vulnerável por diversas razões. A variabilidade natural da qualidade da água bruta e a sobrecarga hidráulica das unidades que o integram são algumas e, além disso, é fato que muitos projetos carregam falhas de dimensionamento, execução e operação, o que incide na vulnerabilidade. Corroboram com essa assertiva a existência de estações que se encontram com potencial de produção minorado ou têm sua expectativa de fim de plano expirada precocemente.

São agravantes para as vulnerabilidades: a demanda crescente de água haja vista o crescimento da população, a vigilância quanto à qualidade do efluente tratado que tende a se tornar extremamente restritiva e a qualidade de águas dos potenciais mananciais que tem se deteriorado gradativamente.

Dessa forma, tendo caracterizado o problema, deve ser resolvido no âmbito da Engenharia Sanitária e Ambiental. É importante verificar se já existem soluções efetivas e, existindo soluções, é importante estudar como podem ser melhoradas. Não obstante, é possível projetar alternativas a partir do conhecimento dos fundamentos que são intrínsecos ao problema construindo ferramentas novas.

A revisão da literatura começa com breve argumentação sobre a evolução do tratamento de água em paralelo com busca da definição de Engenharia Sanitária Ambiental para enquadrar a pesquisa dentro da grande área afim, além disso, comenta-se sobre a abrangência dessa engenharia para facilitar o esclarecimento do conceito ambiental envolvido. Apresenta-se o modo como alguns autores referenciam essa engenharia o que permitiu conclusões de contexto geral e ainda são apresentados argumentos sobre controle e qualidade de água ou de processos; itens que são intrínsecos ao tratamento de água.

Na sequência são estruturados argumentos sobre indicadores e índices que se constituem a especialidade da pesquisa. A abordagem pontua aspectos importantes do uso de indicadores e

índices com considerações e levantamentos de pré-requisitos que devem ser atendidos para que a tradução de informações seja adequada. Além disso, nessa seção têm-se alguns argumentos sobre a aplicabilidade e o papel que os indicadores e índices podem cumprir na definição de prioridades e contribuir na gestão de estações de tratamento de água. Faz-se ainda uma breve alusão à NBR 12216 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) que trata da elaboração de projeto de estação de tratamento de água.

Seguidamente, a revisão aponta razões para que seja avaliado o desempenho das estações de tratamento de água e apresenta argumentos sobre eficiência e eficácia visando interface com gestão das estações de tratamento de água. Encontra-se ainda nessa parte levantamento e comentários sobre metodologias de avaliações de desempenho já propostas e destaca-se a turbidez como parâmetro de qualidade de água fundamental para a avaliação de desempenho. Por fim, expõe-se o papel da avaliação do desempenho voltada para a gestão.

### **3.1 Evolução do tratamento de água**

#### **3.1.1 Contextualização**

O tratamento de água para consumo humano é assunto importante dentro da Engenharia Sanitária. Trata-se de engenharia que sua proposta e conteúdo acumulam uma parcela importante da Engenharia Civil e outra da Engenharia Ambiental, aliás, esta última acaba confundida com a própria Engenharia Sanitária, ou, por isso, o título aplicado para referência a esta engenharia deva ser Engenharia Sanitária e Ambiental tal como é usado por Sperling (2005).

Não obstante a Engenharia Sanitária e Ambiental contemporânea está inserida em um ambiente de multidisciplinaridade, portanto alcança uma gama importante de áreas por questão de afinidade. Para citar, são correlacionadas: a medicina, química, biologia, farmácia e as ciências sociais dentre outras.

A necessidade de tratar a água para consumo não definiu o surgimento Engenharia Sanitária e Ambiental. Existem fatos anteriores que abrangem o saneamento de um modo geral, marcaram historicamente e antecedem o tratamento de água, mas fazem parte do contexto. Não é possível cravar a origem da Engenharia Sanitária e Ambiental, mas cabe identificar algum ponto de partida, assim sendo, remete-se ao fato de que o saneamento nos primórdios consistia na captação

rudimentar de água para abastecimento e conveio ao homem estar alocado nas margens dos cursos d'água para efeito de usufruir dela.

Reconhece-se que o início de tudo aconteceu no Iraque, antiga região da Mesopotâmia, aonde surgiram as primeiras comunidades que viriam ser as primeiras cidades (LIBÂNIO, 2005). À medida da evolução das cidades, o saneamento, objeto da Engenharia Sanitária e Ambiental, se projetou para grande número de concepções seja nas linhas de esgotamento sanitário, drenagem ou águas de abastecimento humano.

Por indução, pode-se argumentar que no momento da história no qual o crescimento das cidades deixa de ser somente longitudinal aos cursos d'água e passa a ser também transversal, a água começa a ficar distante dos pontos de atendimento. Seria um dos momentos iniciais do saneamento e, de forma particular, no que se refere a águas de abastecimento humano. A construção das primeiras redes de distribuição ou aquedutos demonstra que o homem passa a não querer deslocar-se para estar saneado. Havia na época uma espécie de engenharia de práticas sanitárias coletivas em germinação (FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE, 2006).

As civilizações da região da Mesopotâmia são precursoras da Engenharia Sanitária e Ambiental, por conseguinte do saneamento, porém o processo foi descontínuo e difuso. No decorrer da história encontram-se os rastros dos ajustes providos pelo homem na purificação da água com fervura, na construção de aquedutos, nos processos rudimentares de sedimentação e filtração, na construção de termas e banheiros públicos (FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE, 2006).

A Engenharia Sanitária e Ambiental, que poderia ter nascido já sob essa titulação, contemplando tudo que envolve saneamento, passou por períodos de avanço e estagnação. Vale lembrar que o rumo da Engenharia Sanitária e Ambiental não se delineou unilateralmente. Nos quesitos drenagem urbana e esgotamento sanitário as práticas sanitárias coletivas também vinham sendo desenvolvidas (FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE, 2006).

Entre renascimentos e estagnações, a Engenharia Sanitária, denominada assim por Wolman (1977) foi reinventada com cunho sanitário evidente e um cunho ambiental crescente. Wolman (1977), cita Willian T. Sedgwick, do Massachussets Institute Technology, como o possível precursor desta engenharia o qual expressou no desenvolvimento da sua dissertação que o complemento do objetivo primordial da engenharia sanitária, a prevenção de doenças, se encontra complementado

por proteção da vida biológica, recreação e estética. Vem a calhar que intitular essa engenharia como Engenharia Sanitária e Ambiental possa atender plenamente ao contexto.

As expectativas e explanações de Wolman (1977) pressupõem que Willian T. Sedgwick, no seu tempo, indicou um marco importante para a Engenharia Sanitária e Ambiental nos Estados Unidos, mas é possível conceber que os preceitos dessa engenharia andaram difusamente pelo mundo, de um modo geral quanto ao saneamento, e também, mais especificamente, quanto ao tratamento de água.

O Brasil viveu um aquecimento interessante na implantação de práticas da Engenharia Sanitária e Ambiental na década de 1970 quando da vigência do PLANASA – Plano Nacional de Saneamento, particularmente quanto ao tratamento e abastecimento público de água. Esse plano viabilizou muitos investimentos na construção de sistemas de tratamento e abastecimento, porém era somente um momento de adoção de metodologias conhecidas no meio e não foram criadas tecnologias nacionais.

Muitos dos sistemas construídos naquela época estiveram e podem ainda hoje estar trabalhando com sobrecarga e produzindo água com qualidade aquém da esperada para o tratamento implantado (Lopes e Libânio, 2005) o que põe em dúvida o modo como essas práticas foram aplicadas e corrobora com o fato do esfriamento do movimento pelo saneamento com o fim do PLANASA. Na vertente teórica, hoje em dia o Brasil entrou também no rol das pesquisas e desenvolvimento tecnológico na área da Engenharia Sanitária e Ambiental de modo geral e também, particularmente, do tratamento de água.

Não foi encontrado um conceito universal que confirme o título e sintetize tudo que a Engenharia Sanitária e Ambiental tem em seu conteúdo, entretanto são percebidos os indícios da sua existência primeiramente no saneamento para o quesito água de abastecimento, seguidamente, prevenção de doenças, e mais adiante, à medida que cresce o caráter ambiental, vem para a pauta: proteção da vida biológica, recreação e estética. Ruma, portanto, para controle, qualidade e melhoria contínua, com efeito, esses itens constituem elementos de destaque do ponto de vista sanitário e ambiental e estão em evidência no quesito tratamento de água que é objeto do presente estudo.

A aplicação dos conceitos da Engenharia Sanitária e Ambiental tem permitido êxito ao longo dos tempos para identificar aspectos pontuais da necessidade do ser humano, da preservação da sua saúde e da preservação do meio ambiente no que tange ao conforto e à promoção de saneamento

qualificado. Não obstante os conceitos envolvidos são a base para as questões legais na interface ser humano com o meio ambiente. Os desajustes de funcionamento dos sistemas de tratamento e abastecimento, as dificuldades de atender normas e padrões, surtos de doenças e atendimento insatisfatório, indicam uma necessidade de avaliação do estado geral das unidades de tratamento de água em operação; as limitações e as potencialidades.

No eixo águas para abastecimento humano, por exemplo, é cargo da Engenharia Sanitária e Ambiental contribuir na construção de ferramentas para serem aplicadas em controle e qualidade, otimização e gestão ou produzir itens que componham os aspectos legais correlatos visando melhoria contínua e meio ambiente saudável plenamente saneado.

### **3.1.2 Adventos tecnológicos**

No decorrer da evolução do tratamento de água no que concerne a abastecimento público o ponto principal de atenção foi prevenção de doenças. Trussel (2005) evidencia que o campo de estudo da Engenharia Sanitária e Ambiental tem seu horizonte na relação do ser humano com o uso da água e os subprodutos oriundos desta relação; Sperling (2005) expõe essa relação em termos de qualidade de água.

A qualidade da água diminui de forma proporcional ao aumento da quantidade de subprodutos produzida por efeito do uso da água como insumo principal de parte significativa das atividades antrópicas, com isso a relação do ser humano com a água está cada vez mais fadada a um comportamento cíclico, ou seja, no momento de escassez e aumento de subprodutos a necessidade que o ser humano tem de estar abastecido o leva a usar águas de mananciais de pior qualidade o que exige também tratamentos mais elaborados para potabilização.

Sendo o uso da água intrínseco à existência da espécie humana, à medida que a qualidade da água é deteriorada os padrões de qualidade ficam rigorosamente restritivos e, portanto, torna-se importante inferir a qualidade intermediária e final da água (TOWLER *et al.*, 2009) além de pesquisar as causas do não enquadramento da qualidade quando ocorre. Ressalta-se que essa inferência requer ferramentas que permitam coletar dados que expostos e analisados a partir de instrumentos de porte tecnológico e metodologias consoantes, consigam traduzir a qualidade da água e indicar soluções para melhorá-la.



Ao tomar a qualidade de água como ponto de partida é essencial estudar a microscopia da água que quanto às estações de tratamento preserva interface importante com desempenho ou eficiência da potabilização. Wolman (1977), relata que a Engenharia Sanitária e Ambiental é uma fábrica de mudanças, por conseguinte, de tecnologia. Em complemento disso, Trussell (2005) ao buscar um ponto de partida da Engenharia Sanitária e Ambiental, pontua o contexto da microscopia da água onde os principais adventos tecnológicos mencionados são o microscópio e o turbidímetro.

O objeto de investigação que levou à invenção e aprimoramento desses instrumentos está correlacionado ao aparecimento de doenças de veiculação hídrica. O interesse do inventor do microscópio, Antonie Van Leeuwenhoek, era observar bactéria na água (TRUSSELL, 2005). A difusão dos processos de filtração encontra razões nas pesquisas de Leeuwenhoek culminando nos sistemas convencionais de tratamento voltado a concepção de múltiplas barreiras e na evolução das tecnologias com uso de membranas.

Vale destacar que a denominação *tratamento convencional* foi recomendada em 1890 por George Fuller que propôs etapa de clarificação precedendo a filtração em função da turbidez característica das águas do rio Ohio. Anos depois, a tecnologia que aplicasse coagulação na unidade de mistura rápida, floculação e sedimentação, etapas para e feito de clarificação, e posterior filtração, passou a ser classificada como *convencional* (LIBÂNIO, 2005).

Desde a captação até a entrega aos consumidores a água percorre longo caminho. A utilização de múltiplas barreiras reduz os riscos associados à água para consumo humano. São consideradas barreiras a incorporação de medidas preventivas ou otimizadas ao longo do caminho percorrido pela água no sistema de abastecimento a fim de assegurar a qualidade da água final (SILVA, 2008).

Concomitante à remoção de sólidos, as múltiplas barreiras têm a finalidade de reduzir as possibilidades de contaminação microbiológica da água para consumo humano, assim Silva (2008) atribui a eficiência de remoção de patogênicos e a obtenção de efluentes de filtração que apresentem baixa turbidez às boas práticas de tratamento e à proteção de mananciais. Ressalta-se que é importante remover partículas (turbidez) para possibilitar a melhoria da etapa de desinfecção.

No decorrer do tratamento propriamente dito, a água deve passar por um tratamento de várias etapas, principalmente se contiver impurezas de tamanhos variados (VERAS e BERNARDO, 2008). As etapas do tratamento convencional são, portanto, parcela importante das sucessivas

barreiras para a passagem dos sólidos suspensos ou dissolvidos propiciando resistência à passagem de microrganismos para a água tratada nas estações (LIBÂNIO, 2005).

Em resumo, o conceito do tratamento convencional tem seu fundamento principal na remoção de turbidez complementado pela motivação da filtração (retenção de sólidos dissolvidos e concomitante retenção e remoção de bactérias, cistos e oocistos de protozoários no momento da retrolavagem), e ainda, atualmente dentro do fluxograma dessa tecnologia encontram-se a desinfecção, correção de pH e fluoretação, sendo que a ausência da correção de pH e da fluoretação não necessariamente descaracterizam o tratamento convencional.

### **3.1.3 Importância da turbidez no desempenho das estações**

Metais pesados, perturbadores endócrinos, matéria orgânica (formação de trihalometanos), turbidez e coliformes totais são fundamentais parâmetros da qualidade das águas brutas ou naturais. Descartada a existência de metais pesados, perturbadores endócrinos e não havendo excesso de matéria orgânica ou escassez de oxigênio dissolvido, a turbidez é o parâmetro regular determinante da qualidade da água que permite prever o potencial de uso para abastecimento humano e a espécie de tratamento no qual a água deve ser processada para atender aos padrões de potabilidade.

A turbidez é um indicador da qualidade de água extremamente relevante e deve ter peso diferenciado na avaliação de desempenho das estações de tratamento de água. A simples comparação entre a turbidez afluente e a turbidez efluente é medida de desempenho, sendo que a turbidez efluente é pré-requisito de padrão de potabilidade. A turbidez refere-se ao grau de interferência na passagem de luz através da água em decorrência da existência de partículas suspensas e coloidais na massa líquida, as quais ocorrem em ampla faixa de tamanho (SPERLING, 2005; LIBÂNIO, 2005; DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

No decorrer da história vários eventos de destaque nos casos de doenças de veiculação hídrica, relacionados a água para consumo humano são correlatos ao parâmetro turbidez. O emprego da turbidez como parâmetro indicador da eficiência do tratamento reside na associação da remoção desta característica física à conseqüente remoção de cistos e oocistos de protozoários (LIBÂNIO, 2005).

Não foi destacada uma seção exclusiva neste texto para o parâmetro coliformes totais, porém assim como a turbidez este parâmetro é definidor da qualidade da água bruta e do sucesso do tratamento

de água, contudo cabe especificamente a este parâmetro uma análise mais taxativa, até porque o VMP –valor máximo permitido – estabelecido pela Portaria 2914 na saída do tratamento é ausência de coliformes totais em 100ml (BRASIL, 2011), por outro lado, a existência de coliformes totais na água bruta não é incomum e reforça a importância da desinfecção com eficiência favorecida por uma menor turbidez da água tratada.

A Portaria 2914(BRASIL, 2011) determina que se constatado resultado positivos para coliformes totais em amostras coletadas devem ser adotadas ações corretivas e novas amostras devem ser coletadas em dias imediatamente sucessivos até que revelem resultados satisfatórios. E, além disso, quando o padrão microbiológico for violado, os responsáveis pelos sistemas e soluções alternativas coletivas de abastecimento de água para consumo humano devem informar à autoridade de saúde pública as medidas corretivas tomadas (BRASIL, 2011).

#### **3.1.4 Controle e qualidade**

A motivação de saber a qualidade da água natural e tratada é seu uso ou seu estado como relevância para preservação da vida. São várias as ferramentas de gestão que vêm sendo desenvolvidas para dar condições aos prestadores de serviço de escolher as opções disponíveis para melhorias (TOWLER *et al.*, 2009) e a qualidade da água é fator preponderante nas diretrizes e aplicação destas ferramentas, ou seja, a qualidade da água é parte imprescindível do fundamento que inicia os processos de decisão.

Está na Resolução CONAMA 357 (BRASIL, 2005) que a classe do manancial é relevante para a escolha da tecnologia de tratamento a ser aplicada e essa classificação tem peso da qualidade da água natural. A Portaria 2914/2011 no seu *Art. 24* preconiza que toda água para consumo humano, fornecida coletivamente, deverá passar por processo de desinfecção ou cloração pelo menos e no parágrafo único do mesmo artigo define que as águas provenientes de manancial superficial devem ser submetidas ao processo de filtração (BRASIL, 2011), entretanto, a tendência futura é de tratamento que necessite de tratamentos avançados.

A preocupação com a qualidade da água pôs-se em evidência quanto ao desenvolvimento tecnológico: as investigações sobre bactérias, vírus e protozoários; pesquisa de partículas – turbidez e contagem de partículas; lixiviação de contaminantes para os mananciais de abastecimento; filtração por membranas e ozonização (TRUSSELL, 2005). Nesse contexto a necessidade de

análise da qualidade da água inicial e final é intrínseca ao tratamento sendo informação fundamental.

Em se tratando de processos de tratamento de água cabe destaque para filtração por membranas de baixa pressão, filtração por membranas de alta pressão e ozonização que tendem a promover melhor qualidade da água final. Entretanto, é amplamente cabível a adoção dos processos presentes no tratamento convencional: aplicação de coagulante, floculadores de chicanas ou de bandejas perfuradas, decantadores horizontais e de alta taxa, além da filtração rápida com posterior desinfecção. Processos que podem ser estudados do ponto de vista de desempenho a fim de melhorar seus resultados de funcionamento operacional.

Visto isso, é compreendido que na evolução tecnológica está implícito o atendimento de padrões e a eficiência e resiliência dos sistemas. Embora a tecnologia já venha avançando crescentemente inclinando-se para conceitos cada vez mais apurados, há uma grande preocupação com os sistemas em operação e acredita-se que possam ser recuperados ou terem a capacidade ampliada. Podem e devem ser complementados e terem procedimentos de controle e qualidade que contribuam para aumentar o desempenho, porém, antes é preciso saber a capacidade e o estado atual.

### **3.1.5 Aplicação de indicadores e índices em gestão**

Condensar toda a informação sobre o funcionamento de uma estação de tratamento de forma tangível comporta certa complexidade. A fim de eliminar a complexidade o que tem sido comumente proposto é a tradução da informação em números ou num só número. A divulgação e interpretação de dados e parâmetros de qualidade de água de forma inteligível ao público leigo tem sido esforço de vários pesquisadores (LIBÂNIO, 2005).

Uma forma de oferecer a oportunidade de que seja feita essa leitura é lançar mão de indicadores e índices como fizeram (BROWN *et al.*, 1970) que propuseram o IQA – Índice de Qualidade de Água e Souza e Libânio (2009) que propuseram o IQAB – Índice de Qualidade de Água Bruta afluente a estações de tratamento de água. Transcendendo a questão específica de qualidade de água, Lopes e Libânio (2005) propuseram o IQETA – Índice de Qualidade de Estações de Tratamento de Água, mais tarde otimizado por Almeida (2009). Por outro lado, Misael de Oliveira (2014) discute a questão funcional dos sistemas de tratamento de água propondo indicadores.

Os indicadores e índices estão presentes em infinitas abordagens de naturezas as mais diversas nos campos social, econômico, científico etc. De forma grosseira, ambos possuem o mesmo significado, porém a diferença está em que um índice é o valor agregado final de todo um procedimento de cálculo onde se utilizam, inclusive, indicadores como variáveis que os compõem (SICHE *et al.*, 2007).

A utilização de indicadores e índices leva a enxergar individualmente e/ou comparativamente um comportamento, uma tendência ou um sistema sob diversos aspectos a fim de classificar o elemento estudado dentro de uma faixa de possibilidades. Ou seja, o valor obtido do indicador ou índice traduz um nível de atendimento entre satisfatório ou insatisfatório ou, noutra via, enquadra o sistema em classes ou categorias preestabelecidas. Inclusive, para a questão presente, cujo objeto são as estações convencionais de tratamento de água, é esperado que os indicadores e índices sejam medidas de desempenho e viabilizem a hierarquização das estações dentro do universo amostral.

Miranda e Teixeira (2004) elencaram uma série de atributos que os indicadores devem comportar com destaque para a coerência com a realidade local; capacidade de ser quantificável e qualificável; relevância; acessibilidade dos dados que o fundamentam; confiabilidade da fonte; capacidade de síntese. Seguindo a perspectiva de Siche *et al.* (2007), índices que comportem indicadores com esses pré-requisitos serão consequentemente consistentes.

Conclui-se então que indicadores e índices simplificam a visualização das características substanciais do objeto estudado. Vale ressaltar que indicadores e índices não consistem no diagnóstico sobre o que está em estudo, mas apontam indícios do sintoma principal quando há deficiências. Em se tratando exclusivamente de índices, partindo para uma caracterização mais específica de deficiências no objeto analisado, apontar o indicador que contribui mais significativamente para qualquer queda no índice não é tarefa complexa.

Atualmente há um gargalo na gestão de sistemas e processos, principalmente na prestação de serviço público, que reside na dificuldade de definir prioridades. De um modo geral os objetos estudados são vistos de forma confusa havendo muita informação para ser organizada e esclarecida.

A adoção de índices e indicadores pode ser o início da organização das informações visto que o delineamento do planejamento começará na ordem de classificação das prioridades através da identificação do indicador ou indicadores que são mais representativos negativamente ou

positivamente. Após isso, parte-se para a natureza do problema, diagnóstico preciso, planejamento e alocação de recursos.

A intenção de usar sistemas de indicadores é simplificar o modo de entender problemas. Lopes e Libânio (2005), por exemplo, esperavam que um índice pudesse ser uma ferramenta que auxiliasse na comparação e hierarquização de estações de tratamento permitindo enxergar aquelas com o desempenho mais esmerado e as deficientes, por outro lado, o que fazer a partir dessa leitura configura outra etapa. Cabe ressaltar que este trabalho incide de forma importante em definição de prioridades onde o sistema com desempenho menos esmerado deve ser o primeiro a ser melhorado.

Misael de Oliveira (2014) concordou com a existência dessa lacuna afirmando que a maioria dos sistemas de indicadores propostos na literatura ainda carece da definição clara de objetivos de avaliação e de elementos que considerem o contexto de avaliação e, cabe também mencionar o excessivo número de indicadores em sistemas de avaliação propostos. Dado isso, os sistemas de indicadores têm sido frequentemente discutidos e é importante, além expressar os resultados, que os indicadores possam ser concisos em indicar claramente onde intervir e até como intervir.

### **3.1.6 Dimensionamento das unidades de tratamento – NBR 12216**

A resposta de como intervir e onde em se tratando de estações de tratamento de água, ou até de sistemas de abastecimento público de um modo geral, pode começar a ser descoberta na verificação do próprio dimensionamento das unidades que o compõem. É importante por isso aludir às previsões de norma que dão diretrizes para os projetos de estações de tratamento de água. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) tem no seu quadro de normas a NBR 12216 para dimensionamento de estações de tratamento de água.

Aliás, sendo a NRR 12216 de 1992, cabe considerar que há certa desatualização. Uma das implicações disto é que a norma acaba por não especificar de forma apropriada alguns conceitos do seu próprio texto, por exemplo, o conceito de capacidade nominal e capacidade máxima não ficam bem esclarecidos. Inclusive, a presente pesquisa discute nos termos da sobrecarga a capacidade máxima, sendo que a sobrecarga está aqui definida como situações de operação a que a estação de tratamento esteve submetida além daquela considerada pelo projetista seja do ponto de vista hidráulico ou de qualidade da água afluente.

A elaboração do projeto da estação de tratamento de água pressupõe conhecidos alguns elementos como capacidade nominal, manancial abastecedor e características da água, e ainda, o dimensionamento hidráulico deve considerar as vazões mínimas e máximas levando em conta a divisão em etapas e a possibilidade de sobrecargas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992). A partir desses elementos faz-se o delineamento do dimensionamento dos equipamentos, lembrando que a capacidade nominal nos termos da norma acaba confundida com capacidade de vazão nominal e a sobrecarga não está caracterizada na norma, porém formulou-se acima uma definição que sustenta conclusões sobre as estações ora amostradas.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), NBR 12216, alude a duas alternativas de dimensionamento. Por exemplo, para dimensionamento das unidades de mistura rápida as condições ideais em termos de gradiente de velocidade, tempo de mistura e concentração da solução de coagulante devem ser determinadas preferencialmente através de ensaios de laboratório, isso seria a alternativa que melhor ajustaria o dimensionamento. Entretanto, não havendo viabilidade de execução dos ensaios, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) faz recomendações de gradientes de velocidade compreendidos entre 700 e 1100 s<sup>-1</sup>, em um tempo de mistura não superior a 5 s para a aplicação de coagulantes metálicos hidrolisáveis o que se constitui uma segunda alternativa para dimensionamento.

Assim como para a mistura rápida o dimensionamento das outras unidades de tratamento segue a mesma perspectiva dentro da NBR 12216, tendo uma alternativa de dimensionamento baseado na premissa de ensaios e outra com efeito de recomendação baseada em averiguações que propõem a utilização de parâmetros usuais. A adoção de uma alternativa ou outra tem implicações no dimensionamento quanto a superdimensionamento e, como está em aberto discussão sobre sobrecargas e variação da qualidade da água bruta, é importante relevar este aspecto.

Cabe aqui esboçar um detalhe: é difícil saber o fundamento de dimensionamento de todas as estações de tratamento de água operando atualmente com sobrecarga, portanto fica a dúvida se esta sobrecarga não é aparente, relativa ao projeto original que previu a capacidade nominal, ou se é sobrecarga de fato corroborando eventualmente com resultados ruins no atendimento dos padrões. E ainda, por outro lado, fica a dúvida se os procedimentos operacionais das estações levam a resultados ruins não estando ajustados à previsibilidade de desempenho satisfatório.

Portanto, quanto a NBR 12216 pode-se frisar que devido à desatualização pode ocorrer dúvida do projetista. A norma cita sobrecarga, mas não a define e além, disso no que se refere às alternativas de dimensionamento, a norma não esclarece as implicações em adotar uma ou outra. Então fica proposto nesta pesquisa um conceito de sobrecarga e prevê-se uma contribuição na discussão das implicações do uso de uma ou outra das alternativas.

### **3.2 Relevância da avaliação de desempenho de ETA**

A visão de Jones e Sowby (2014) adaptada para estações de tratamento de água exprime que são três os parâmetros que traduzem uma operação eficiente quais sejam: eficiência energética, sistema de avaliação de desempenho e a qualidade da água.

Para essa adaptação, a eficiência energética é parâmetro intrínseco a custos de insumos, investimentos e procedimentos operacionais que podem ser otimizados; o sistema de avaliação do desempenho é a ferramenta de verificação do sucesso dos procedimentos operacionais adotados e do tipo de tratamento escolhido considerando as variáveis correlatas e; a qualidade de água é a medida direta do resultado do tratamento, ou seja, aferição do atendimento, no mínimo, dos padrões estipulados por lei.

Os três parâmetros identificados por Jones e Sowby (2014) têm sobreposições, entretanto, a avaliação de desempenho é o passo inicial para otimização dos processos e melhoria dos resultados das operações unitárias que ocorrem nas estações de tratamento. O resultado da avaliação implica nas diretrizes e indica as melhorias necessárias.

A avaliação do desempenho constitui-se importante instrumento de gestão à medida que pode nortear a definição de prioridades para ajustar, ampliar ou até mesmo, descartar estações em operação. Note-se que ajustar e ampliar concerne não somente a questões físicas dos equipamentos, mas também a questões de ordem operacional e administrativa.

A avaliação do desempenho no atendimento das premissas legais e no diagnóstico de funcionamento das estações de tratamento de água é primordial. O interesse na avaliação por parte das empresas envolvidas, das concessionárias ou autarquias municipais que prestam serviços de saneamento é importante sendo que as ações das agências reguladoras e os aspectos legais tendem a provocar os prestadores de serviço a tomar iniciativas para melhorar o desempenho das estações.



O interesse na avaliação de desempenho parte de que as ações de planejar, automatizar e otimizar são atuais e necessárias. A partir de que as questões ambientais atuais põem em cheque tudo que envolva uso de recursos naturais e preservação da espécie humana, na tendência para a escassez que o mundo vive, não há outra saída a não ser primar pela cautela e pela busca contínua de soluções e melhorias a partir dessas ações.

Quanto a isso, para alcançar qualquer propósito de otimização é necessário avaliar e identificar os potenciais desafios e melhorias. Assim, é importante que profissionais qualificados colaborem com o processo e que tenha participação de gestores e operadores, afinal um estudo para otimização compreende a captura de informações, o desenvolvimento de um modelo operacional adequado e o conhecimento do sistema em operação (MERCER, 1985; JONES e SOWBY, 2014).

Levantam-se três questões com implicações em casos específicos de prestadores de serviço com capacidade ferramental e de gerenciamento limitadas, e possivelmente até de estruturas de médio para grande porte na mesma situação, quais sejam: a qualidade das informações que fundamentam o processo de análise, a afinidade da ferramenta usada com especificidade do caso e o dimensionamento e qualificação da equipe que desenvolverá o processo de avaliação, fomentará e gerenciará a execução dos processos de melhoria propriamente ditos.

### **3.2.1 Abordagens para avaliação de desempenho de ETA**

A iniciativa de avaliar o desempenho das estações de tratamento de água e sistemas de abastecimento em geral está difusa por todo o mundo. Estão destacados aqui alguns trabalhos desenvolvidos no Brasil, África do Sul, Taiwan e Canadá. Nestes países foram desenvolvidas as pesquisas que estão discutidas no decorrer desta seção.

Makungo *et al.* (2011) desenvolveram na África do Sul estudo apropriado a estações de pequeno porte a fim de avaliar desempenho com foco na concentração de metais e não metais, *E. coli*, pH e turbidez da água bruta e da água tratada com metodologia direcionada à obtenção de informações sobre a conformidade no atendimento às referências normativas para estes parâmetros. Os esclarecimentos quanto à conformidade foram baseados em uma parcela da metodologia proposta por Vieira *et al.* (2008) especificamente no que compete à qualidade da água.

Vieira *et al.* (2008) propuseram sistema de indicadores de desempenho, no caso de abastecimento de água, fundamentados em informações da qualidade da água tratada, condições ambientais onde

o sistema de atendimento está inserido e na qualidade da prestação de serviço, inclusive mencionando custos do serviço. Makungo *et al.* (2011) restringiram-se às informações sobre a qualidade da água bruta e tratada verificando a conformidade do desempenho fundamentado em análises comparativas com referência nos limites estabelecidos pelo Department of Water Affairs (DWA), agência reguladora sul africana da cidade de Pretória. Makungo *et al.* (2011) não se aprofundaram em observações posteriores sobre causas de eventual não conformidade.

Controle de qualidade da água tratada, modificação e plano de contingência, vazão tratada, redução de custos com produtos químicos, disponibilidade de equipamentos, minimização de resíduos e proteção do manancial são propostos por como indicadores do desempenho de ETA, cada qual com sua relevância segundo a metodologia de pesquisa adotada, resumindo que as partes importantes no desempenho do tratamento são gestão, manutenção e áreas de operação.

Chang *et al.* (2007) concluíram sobre as parcelas que compõem a eficiência e eficácia da estação de tratamento dividindo sua perspectiva de análise entre objetivos econômicos e objetivos efetivos com relação ao enquadramento dos resultados de turbidez da água tratada, porém não discutem a qualidade da água no decorrer do processo. Os elementos fundamentais da proposta de Chang *et al.* (2007) para o cálculo de desempenho são os custos e a turbidez da água tratada que são intrínsecos aos indicadores propostos na pesquisa.

Rahman & Zayed (2009) definiram como objetivo principal de sua pesquisa a obtenção de modelos de avaliação das condições das unidades de tratamento de água a partir de parâmetros fundamentais de ordem técnica, estrutural, ambiental e operacional. Trata-se de uma proposta de avaliação bastante abrangente que permitiria inclusive hierarquização de estações segundo o Índice de Avaliação da Condição das unidades, ou seja, somadas notas de cada uma pode-se comparar as notas finais de determinado número de estações de tratamento.

Considera-se limitação para aplicabilidade da proposta de Rahman e Zayed (2009) o fato de requerer informações detalhadas que podem não estar disponíveis de imediato. Trata-se de registros do histórico de funcionamento da estação. Nem todos prestadores de serviço fazem esse registro o que inviabiliza a aplicação imediata do modelo.

Percebe-se também alguma subjetividade na aplicação desenvolvida por Rahman e Zayed (2009). Para ilustrar essa assertiva comenta-se sobre um dos itens de avaliação: o nível de controle de

qualidade durante o trabalho de construção da estação. Esse nível é de difícil mensuração principalmente quando não existem dados cadastrais detalhados das estações de tratamento.

A grande vantagem da aplicação do trabalho de Rahman e Zayed (2009) é exatamente o nível de detalhes que pode alcançar, em contrapartida, percebem-se gargalos de ordem prática e a subjetividade. A parcela coincidente do trabalho de Rahman e Zayed (2009) com a pesquisa proposta na presente dissertação é interface com a visão de prestador de serviço perceptível na preocupação com o estado físico da infraestrutura das estações de tratamento de água.

Quanto às estações de tratamento de água a qualidade da água tratada é a principal medida de desempenho (Zhang *et al.*, 2012). Entretanto, medidas de desempenho relativo podem ser obtidas verificando as condições gerais de infraestrutura, da qualidade da água bruta afluente às estações e da qualidade da água verificada no decorrer do processo. Também essa medida relativa é importante para avaliar o desempenho e eventuais sobrecargas das unidades da estação de tratamento de água; Zhang *et al.*(2012) consideram isso.

O trabalho de referência que compartilha mais semelhanças com a presente pesquisa é exatamente o construído por Zhang *et al.* (2012) que desenvolveu equações de desempenho separando seus objetos de avaliação em três unidades: unidade 1 - coagulação, floculação e decantação (clarificação); unidade 2 – filtração (barreira física para passagem de sólidos e microrganismos) e unidade 3 – desinfecção (eliminação ou inativação de microrganismos patogênicos ou não).

O trabalho de Zhang *et al.* (2012) tem como *input* a contabilização de falhas e sucesso no tratamento da água para parâmetros de sólidos suspensos para as unidades 1 e 2, a diferença entre o alcançado e o requerido para os valores de coliformes totais no caso da unidade 3 e as predições balizadas em informações de agências, organizações ou vigilância sanitária quanto à taxa de infecção da população para avaliação de risco de contaminação microbiana resultando em medida de aceitabilidade de risco.

A diferença da presente pesquisa para a pesquisa de Zhang *et al.* (2012) é que uma se baseia em constatações a partir dos relatórios de monitoramento para identificar eventuais falhas e as causas e a segunda demonstra previsões para o desempenho baseado no histórico da estação integrando os conceitos de confiabilidade, resiliência, robustez e AQRM – Avaliação Quantitativa de Risco Microbiano. Entende-se que Zhang *et al.* (2012) obtêm medidas indiretas do desempenho e no caso

dessa pesquisa em desenvolvimento os relatórios diários de monitoramento retornam medidas diretas de desempenho.

Cabe expressar ainda que a presente pesquisa expressa cada indicador como medida de desempenho e, individualmente, o resultado dos indicadores leva a uma análise qualitativa do desempenho que permite caracterizar as deficiências da estação. Além disso, aprofunda-se mais na interface entre as etapas do tratamento convencional e contempla-se como indicador a cor da água tratada e aspectos operacionais como a regularidade de lavagem dos filtros o que constitui diferenças para o trabalho desenvolvido por Zhang et al. (2012).

Dá-se destaque nessa pesquisa a alguns trabalhos de autores brasileiros. O desenvolvimento do Índice de Qualidade de Estações de Tratamento de Água - IQETA, a partir de indicadores correlatos aos parâmetros intervenientes no tratamento de água (LOPES e LIBÂNIO, 2005), é pioneiro na avaliação de desempenho de estações. A proposição de 19 indicadores objetivou conter na análise de desempenho parte significativa do grupo de parâmetros específicos das estações (gradientes, velocidades, tempo de detenção hidráulica, fatores operacionais, características de projeto etc.).

Didaticamente o trabalho de Lopes e Libânio (2005) é de grande riqueza porque aborda parcela importante das variáveis envolvidas no tratamento de água convencional. O trabalho de Zhang *et al.* (2012) tem semelhanças como desenvolvimento do IQETA, mas enquanto o IQETA foi proposto para avaliar as unidades de tratamento integralmente, Zhang et al. (2012) separaram algumas unidades.

O IQETA foi discutido por Almeida (2009) que identificou que o número de 19 indicadores é extenso e o resultado disso foi a otimização do IQETA para facilitar a aplicação em escala real. Por que era atribuída ao IQETA alguma limitação no sentido de obtenção dos indicadores e superposições entre eles, o IQETA<sub>12</sub> foi proposto por Almeida (2009) com 12 indicadores.

A facilidade de aplicação em escala real, além da simplicidade de entendimento e obtenção, é preocupação pertinente à medida que nem todos os gestores de estações de tratamento de água contam com especialistas no seu quadro profissional e, por isso, baseiam suas ações no conhecimento geral. Indicadores que sejam claros, simples e facilmente obteníveis contribuem para eliminação dos gargalos e viabilizam propostas de soluções claras, evitando as complexidades que por vezes nem são reais e sim o que se tem é uma impressão de complexidade.

O IQETA<sub>12</sub> otimizado é composto de forma majoritária por variáveis bem específicas que expressam o projeto hidráulico das unidades de tratamento, a única variável intrínseca à operacionalização é a lavagem auxiliar. Almeida (2009) acabou por restringir a explicação do desempenho das estações de tratamento de água ao arranjo hidráulico baseando sua teoria em fundamentos estatísticos.

O IQETA<sub>19</sub> de Lopes & Libânio (2005) é uma teoria a ser destacada pelo fato de considerar como parcela a qualidade da água bruta dando importância à execução do *Jar Test*. Ainda quanto ao IQETA<sub>19</sub>, a variável *grau de instrução da equipe* influenciando a qualidade operacional pode ou não ser determinante. O nível de conhecimento dos profissionais é de difícil avaliação, portanto, o simples fato de uma equipe ter um grau de escolaridade superior ao de outra não significa maior perícia e zelo nos procedimentos (LOPES e LIBÂNIO, 2005). O grau de instrução poderia ser avaliado sob outro ângulo, por exemplo, rotina e frequência de treinamentos ou existência ou não de procedimento operacional padrão.

A pesquisa em desenvolvimento dá importância para a qualidade da água inicial, intermediária e final e propõe considerar os fatores que interferem no desempenho. Nesse caso argumenta-se que o IQETA<sub>19</sub> perde em praticidade, mas ganha em conceito e amplitude de abordagem dos fatores correlatos ao desempenho, sendo que a explicação do desempenho não é exclusivamente numérica, por outro lado, o IQETA<sub>12</sub> realmente se confirma como inferência objetiva para medida do desempenho das estações convencionais de tratamento de água.

Embora nesse texto não estejam sendo abordadas comparações entre tecnologias de tratamento de água, convém registrar que esse tipo de visão foi explorado por Melo (2014). As variáveis que sustentaram aquele trabalho são dados de água bruta e tratada considerando os parâmetros turbidez, cor aparente, concentrações de cloro e de flúor residuais, pH e coliformes totais.

Melo (2014) direcionou a pesquisa para análise de confiabilidade e considerou a sazonalidade nos seus estudos, fundamentados em análise estatística a partir de ferramentas que possibilitam comparações. A coincidência do trabalho de Melo (2014) com a pesquisa ora desenvolvida é que a medida direta dos parâmetros tornou-se a matéria-prima para a resposta do desempenho o que propiciou praticidade.

A qualidade da água bruta parece ser mais relevante que as características da estação de tratamento no atendimento a padrões de potabilidade mais restritivos (OLIVEIRA, Mariângela de, 2014). Essa

assertiva evidencia a qualidade da água do manancial, que não está ponderada de forma direta no dimensionamento das estações de tratamento de água prescrito na NBR 12216 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), e é aceitável argumentar que há complexidade de fato em inserir a previsão da variabilidade da água bruta no dimensionamento das estações.

Quanto à atividade de potabilização, a utilização de índices e modelos de desempenho com proposta de generalização está relacionada a inúmeros processos e variáveis que tornam essa tarefa árdua e até certo ponto frustrante se comparada a outros projetos com uma proposta mais restritiva (OLIVEIRA, Mariângela de, 2014). A medida certa da dimensão do modelo ou da resposta que se queira através da aplicação de índices é um grande desafio. Nenhuma proposta de índice ou sistema de indicadores ou modelo é desperdiçada quando há clareza do que se quer obter como esclarecimento.

Mariângela de Oliveira (2014) concluiu que a estatística aliada ao conhecimento de especialistas pode contribuir com os gestores de sistemas de tratamento e distribuição de água, mas fica claro no conteúdo do seu trabalho de previsão do desempenho de estações de tratamento de água através de dados pretéritos de parâmetros água bruta e das unidades de tratamento, que é importante se preocupar com o tamanho da parcela do universo de variáveis a investigar. Isso abre precedente para uma análise mais simplificada e com maior autonomia do investigador porque ele próprio deve conhecer a razão para sua investigação e deve prever a espécie de resposta que será obtida, possivelmente sem investigar o universo inteiro.

Misael de Oliveira (2014) definiu sua parcela de interesse que é o ponto de vista das agências reguladoras que normatizam o setor de saneamento e, como o universo de indicadores aplicáveis é extenso, foram apontados alguns indicadores de relevância segundo opinião de uma agência reguladora que se dispôs contribuir. Ou seja, outra agência poderia ter elencado outros indicadores, mas o interesse ficou claro daquela agência reguladora e foi desenvolvido um produto válido para a avaliação de desempenho.

O conjunto de indicadores de desempenho proposto contemplou os temas: saúde pública, infraestrutura e economia, sendo que sustentabilidade ambiental, relacionamento com o usuário, absenteísmo, distribuição funcional e segurança foram desconsiderados (OLIVEIRA, Misael de, 2014). Como consequência disso diminuiu-se a abrangência do sistema de indicadores a partir de

análise estatística, porém a desconsideração de alguns temas talvez tenha restringido o alcance de repostas.

Misael de Oliveira (2014) não se preocupou com perdas de efetividade e manteve o sistema de indicadores, entretanto recomendou que maiores esforços sejam envidados na definição de objetivos do sistema de avaliação com o propósito de assegurar maior concordância no encadeamento de temas, critérios e indicadores, ou seja, o sistema de indicadores proposto é efetivo e não está fechado a novas agregações ou novas abordagens que usem a mesma metodologia para obtenção de indicadores.

O sistema de Misael de Oliveira (2014) viabilizou a hierarquização e uma visão organizada, portanto é objetivo cumprido. Sustentabilidade ambiental, relacionamento com o usuário, absenteísmo, distribuição funcional e segurança podem ser vistos de forma individual ou inter-relacionada entre dois, três ou mais temas. No caso da presente pesquisa somente o tema infraestrutura está evidenciado.

A avaliação de desempenho de estações de tratamento de água está inserida numa discussão dinâmica cabendo análises restritas ou abrangentes. Alguns autores apostam na consulta a especialistas, outros na estatística ou na discussão teórica, na criatividade etc. Não haverá ferramenta universal, porém, a proposição deve ser sempre cautelosa quanto à complexidade, à abrangência e à efetividade. Não é possível obter na maioria das vezes todas as respostas, mas se aplicado todo potencial das ferramentas à disposição é impossível não obter respostas consistentes por mais simples que sejam as ferramentas.

### **3.2.2 Relação entre desempenho e gestão**

A implantação de uma gestão adequada passa por uma percepção coerente sustentada a partir da adoção de instrumentos de monitoramento que possibilitem o alcance do objetivo de reduzir impactos negativos e trazer resultados positivos para o ambiente, a sociedade e a economia (MIRANDA e TEIXEIRA, 2004). A visão de melhoria de desempenho está inclinada a essa razão.

Chiavenato apud Dalla Valle *et al.*(2012) argumentou que as organizações tendem buscar novas formas para aperfeiçoar o desempenho, alcançar resultados e atingir a missão organizacional, onde o pleno atendimento das necessidades requer inovação, mobilidade, fluidez, flexibilidade e

descentralização. A soma destes fatores tende a ser indicativa de uma gestão moderna e encorpada orientada para a melhoria contínua.

O déficit operacional, do ponto de vista de funcionamento e produção dos sistemas de saneamento, cujos responsáveis são autarquias, concessionárias e município, desperta interesse no momento em que as perspectivas de melhoria contínua induzem a avaliações que contenham argumentos de organização e de arranjo logístico adequado. Esses são elementos que não são plenamente percebidos no serviço público, porém, profissionais da área nos diferentes níveis hierárquicos têm sentido a necessidade de enxergar os problemas com mais clareza e organização a ponto de conseguirem ser objetivos e coerentes com suas decisões.

Uma abordagem minuciosa com fins de diagnóstico é fundamental, porém quando se trata de sistemas com muitos componentes, uma leitura dinâmica, não por isso, superficial, que viabilize a definição de prioridades, é útil. A maioria das vezes a questão é exatamente por onde desencadear o processo de melhorias e se será efetivo.

Vale destacar a colocação de Di Bernardo e Dantas (2005) na qual afirmaram que a sustentabilidade de um sistema de abastecimento de água é função da cultura e costumes de uma população, da capacidade de endividamento da comunidade, existência de mão-de-obra qualificada, vazão demandada, confiabilidade na operação e manutenção, padrões de potabilidade etc. Embora a abordagem presente aqui não inclua sustentabilidade, na visão integrada, os fatores expressos pelos autores são preponderantes para o desempenho das estações de tratamento de água para consumo humano, e ainda, para o presente estudo, de forma direta, há familiaridade maior com os três últimos.



#### 4. METODOLOGIA

Para início da pesquisa foi necessário aprofundamento na tecnologia de tratamento de água convencional a fim de definir indicadores de desempenho operacional correlatos às unidades características dessa tecnologia definidas na NBR 12216 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992). Alguns indicadores foram definidos e são afins a certa unidade de tratamento (clarificação, filtração ou desinfecção), e outros ao conjunto inteiro de unidades.

Assim, arbitrariamente, um grupo de indicadores de desempenho foi desenvolvido e proposto para ser aplicado a cinco estações convencionais de tratamento de água. Os dados utilizados para fundamentar os indicadores foram coletados em relatórios que contém informações do monitoramento operacional de estações convencionais, preenchidos diariamente, fornecidos por uma autarquia municipal responsável pela gestão dos serviços de saneamento no interior de Minas Gerais.

O tratamento convencional consiste em parcela importante das múltiplas barreiras com função de tornar a água potável. O prestador de serviço tem necessidade de conhecer o resultado do desempenho em cada uma das unidades de tratamento a fim de identificar eventuais falhas e sobrecargas, então foram projetados os indicadores para calcular o desempenho geral das estações. Somado a isso, os indicadores definidos são também para avaliação dos desempenhos parciais na clarificação, na filtração e na desinfecção.

As possibilidades de projeção de indicadores com essa finalidade podem ser inúmeras e, nesse caso, foi desenvolvido determinado número de indicadores a partir do conhecimento adquirido sobre a tecnologia convencional. As possibilidades foram levantadas considerando os conceitos de taxa de filtração; vazão nominal; vazão de operação; gasto com água de lavagem; água bruta, água decantada e água tratada; além dos aspectos microbiológicos representados pelo parâmetro coliformes totais.

As diferenças entre as características da água bruta, da água decantada e da água tratada, entre a vazão de operação e a vazão nominal, entre o gasto de água de lavagem requerido e o consumido, além dos percentuais de atendimento dos padrões legais, são informações operacionais consideradas importantes para a avaliação de desempenho. Os indicadores foram definidos a partir dessas diferenças e do atendimento de padrões de potabilidade.

Cabe observar que a proposta foi desenvolver novos indicadores e, portanto, não foram elencados em nenhum momento indicadores de sistemas propostos na literatura para compor novo sistema de indicadores. Entretanto, feita a proposição do sistema, foi verificada a possibilidade de interface dos novos indicadores com outros indicadores a partir da própria revisão da literatura. Os indicadores foram definidos sob o ponto de vista de prestador de serviço visando a maior afinidade possível com a operacionalização e gestão das estações de tratamento de água para abastecimento público.

#### **4.1 Obtenção de indicadores - Definição**

As estações estudadas foram projetadas para vazões nominais entre 20 l/s e 60 l/s, integradas a sistemas de pequeno porte projetados para atender populações entre 8500 a 26000 pessoas aproximadamente. São sistemas localizados no interior de Minas Gerais. Todas as estações são de tecnologia convencional de tratamento de água, sejam as construídas em concreto ou as pré-fabricadas em PRFV – Polietileno Reforçado com Fibra de Vidro, lembrando que o tratamento convencional consiste basicamente em mistura rápida, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção.

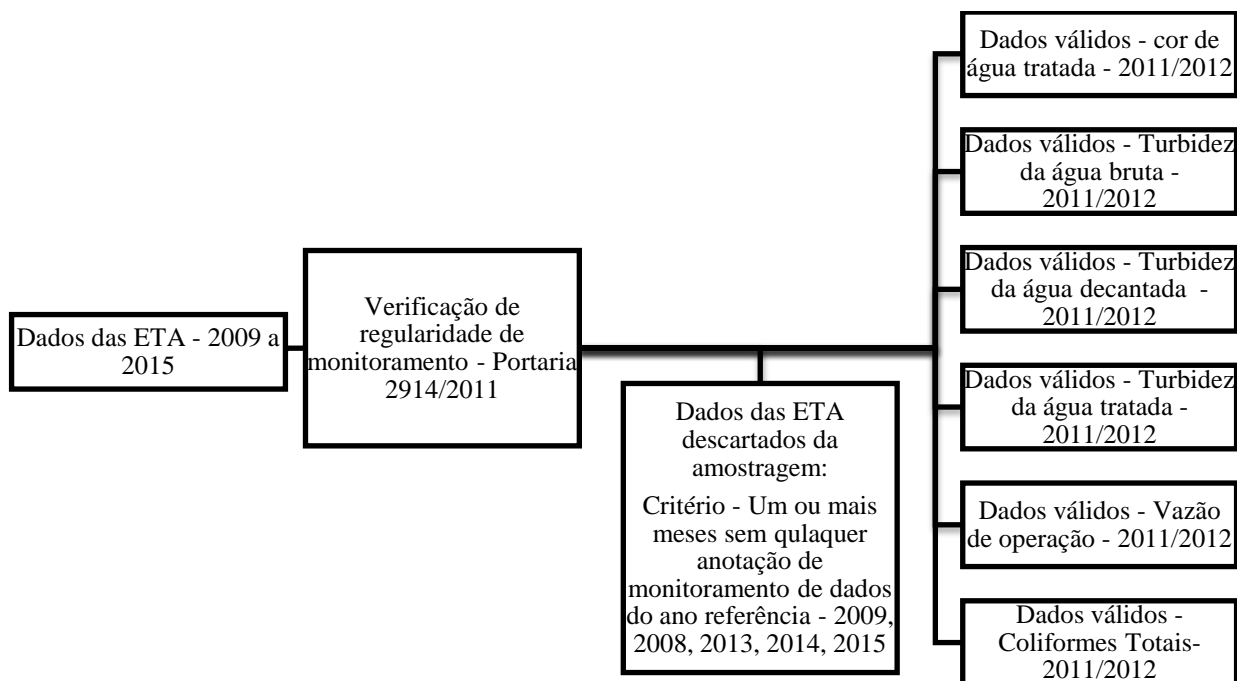
As características das unidades de tratamento têm diferenças de projetos entre umas e outras estações. Algumas ETA têm medição de vazão afluyente instantânea por sensor óptico e em outras a medição da vazão é feita através de régua graduada e aplicação das equações do Medidor Parshall. E ainda, a água afluyente não passa por tratamento preliminar em todas as estações.

As unidades de coagulação têm variantes entre as estações de tratamento amostradas quanto à aplicação do produto químico, isso implica no resultado da coagulação, sendo que ora foi identificado o uso de cloreto de polialumínio e ora o sulfato de alumínio. Os floculadores são de bandejas perfuradas ou são do tipo Alabama. Os decantadores são retangulares de escoamento horizontal ou de alta taxa. Os filtros são de escoamento descendente, sendo que em algumas ETA têm camada simples e em outras, camada dupla.

A disponibilização de dados de estações de tratamento de água para o tipo de estudo pretendido não é muito facilitada e na prática podem ser encontrados relatórios de monitoramento diário com informações mínimas, relatórios com informações além das requeridas legalmente e relatórios defasados. Embora o banco de dados à disposição apresentasse ausência de algumas anotações foi

decido explorar a oportunidade e mesmo assim avaliar o desempenho das estações, observados os critérios conforme descrito no plano de amostragem (Figura 1).

Figura 1: Plano de amostragem para determinação dos períodos com dados válidos



Fonte: O autor

Os dados observados e anotados com maior regularidade nos relatórios fornecidos foram coliformes totais, cor da água tratada, turbidez da água bruta, turbidez da água decantada, turbidez da água tratada e vazão de operação. Estiveram disponíveis dados de coliformes totais na íntegra para todos os anos, desde 2009. Os dados de lavagem dos filtros foram levantados conforme o tempo despendido em cada retrolavagem e o número de procedimentos registrado em cada ano nos relatórios diários. Assim o banco de dados viabilizou número razoável de indicadores dentre as possibilidades levantadas e para cada um a expressão de cálculo que fornece o valor seja como fração percentual do todo ou magnitude relativa a uma referência.

#### 4.2 Análise de consistência dos dados

Foi importante utilizar conceitos e ferramentas estatísticas que contribuíram para caracterização dos dados, em espécie e quantidade, para verificar correlações entre variáveis e para identificar

informações à primeira vista ocultas. Isso melhorou a consistência e proporcionou maior confiança em concluir.

Segundo a autarquia que forneceu os dados, os sistemas a serem estudados tiveram seu início de monitoramento com preenchimento de relatórios de operação no ano de 2009. Ao investigar o banco de dados foi percebido início de monitoramento falho com grandes períodos sem anotações o que de antemão percebeu-se desajustado com os preceitos da Portaria MS 518/2004, que vigorava na época, revogada pela Portaria MS 2914/2011 (BRASIL, 2011). Foram disponibilizados dados de 2009 a 2015. Os dados disponibilizados de 2013 a 2015 apresentaram ainda maior defasagem de anotações que nos anos iniciais de monitoramento (Figura 1).

#### **4.2.1 Análise Interquartil**

A partir da triagem entre os dados dos períodos disponíveis notou-se que os relatórios dos anos de 2011 e 2012 continham dados com melhor organização e consistência, conforme delineado no plano de amostragem (Figura 1), por isso decidiu-se por avaliar o desempenho das estações de tratamento nesses períodos. A regularidade de preenchimento dos relatórios de monitoramento é fundamental para a gestão das estações de tratamento de água visto que são eles que vão atestar a conformidade operacional.

Cabe constar que eventuais falhas nos relatórios decorrentes de períodos de manutenção de aparelhos, imprevistos que implicam em ausência temporária de operadores e falha de suprimento de reagentes, dentre outros eventos, são inconvenientes que acabam por acontecer. Embora tenham sido encontradas algumas ausências de anotações nos relatórios, não foram feitas estimativas ou interpolações para preencher as lacunas. Foram analisados os relatórios com as anotações tais como registradas pelos operadores nos relatórios com posterior verificação dos dados atípicos ou anormais.

As observações atípicas podem ser consideradas *outliers* ou dados inconsistentes. Esses dados apresentam valores muito destacados do restante e, para dados ambientais originados de eventos de ocorrência aleatória, neste caso, avaliados para identificar anormalidades, a existência de valores atípicos pode indicar características peculiares da população ou constituir erros de medição que distorcem os resultados dos testes estatísticos.

Os dados vistos como inconsistentes por erros de medição ou registro foram determinados com base nos limites da literatura e a identificação dos *outliers* foi realizada utilizando o método exploratório dos interquartis (Análise Interquartil – IQ): amplitude dos dados entre os percentis 25 e 75%. Os dados cujos valores estavam entre 1,5 x IQ e 3,0 x IQ acima ou abaixo dos percentis 25% e 75% foram considerados *outliers* e aqueles cuja diferença foi maior que 3,0 x IQ, valores extremos.

Foi feita plotagem dos gráficos da análise exploratória IQ dos dados de 2011 e 2012 correspondentes aos parâmetros cor da água tratada, turbidez da água bruta, turbidez da água decantada, turbidez da água tratada e vazão de operação com o auxílio do Statistica 7.0 (STATSOFT, 2007). Esses dados foram caracterizados como dados fundamentais que consistiram na base de cálculo de onze dos treze indicadores propostos. Coliformes totais e dispêndio de água de lavagem foram considerados dados de natureza distributiva não relevantes por definirem somente constatação de informação.

Os dados destacadamente inconsistentes devido a erro de registro ou medição, depois de identificados, foram censurados, porém na consolidação dos dados de cor da água tratada, turbidez da água decantada, turbidez da água tratada e de vazão foram considerados os *outliers* e valores extremos com propósito de identificação das anormalidades que ocorreram no tratamento em função de desvios, vícios operacionais e deficiências estruturais.

Além disso, os valores considerados *outliers* e extremos das características da água bruta foram identificados, entretanto mantidos no banco de dados, pois ocorrem naturalmente em momentos de precipitações intensas nos períodos chuvosos.

Soma-se a isso que para consolidar os dados válidos foram analisados os limites de tratabilidade de uma estação convencional recomendados na literatura sendo para cor aparente 1000 uC e turbidez da água bruta 3.000 uT (KAWAMURA, 1991). Foram excluídos os dados com valores nulos para as variáveis: cor aparente da água tratada, turbidez da água bruta, da água decantada e da água tratada.

#### **4.2.2 Análise de distribuição dos dados**

As distribuições probabilísticas são fundamentais para o uso da estatística no julgamento da confiabilidade de dados e para aplicação de teste de várias hipóteses (Skoog *et al.* 2006). É

importante a verificação do comportamento distributivo dos dados para, por exemplo, verificar se os testes a serem aplicados devem ser paramétricos ou não paramétricos quando se pretende verificar a correlação entre variáveis numa aplicação de análise bivariada. Existe uma infinidade de definições e espécies de distribuição de dados e para o caso da presente pesquisa é suficiente saber se os dados fundamentais tendem à distribuição normal ou não normal. Sendo a distribuição verificada como normal os dados deverão ser explorados a partir de testes paramétricos, do contrário, devem ser usados testes não paramétricos.

A análise exploratória IQ deu indícios da distribuição não normal com assimetria negativa dos dados, porém agregou-se a avaliação da distribuição com gráficos de frequência para confirmação da assimetria negativa. A análise de frequência das variáveis foi interessante também para a visualização da amostragem de dados explorada em termos de quantidade de dados.

#### **4.2.3 Análise de componentes principais dos dados**

A ACP (Análise de Componentes Principais) é uma ferramenta que permite capturar informações relevantes ao entendimento o qual se almeja apresentar. O conjunto de dados, que será analisado com vista a este entendimento, estará organizado na forma de uma matriz de dados bidimensionais na qual as linhas podem ser amostras e as colunas as variáveis (MATOS *et al.* 2003). As colunas podem ser também fatores intervenientes de algum fenômeno analisado. A análise multivariada comporta relações entre duas ou mais variáveis.

A finalidade da análise exploratória a partir da ACP é reduzir a dimensão original dos dados e modelar, detectar comportamentos anômalos no fenômeno investigado (*outliers*) e/ou determinar número otimizado de variáveis (WOLD *et al.*, 1987), sendo que a técnica básica para análise utilizada nessa pesquisa é a identificação de agrupamentos dos pontos gráficos que denotam variáveis e amostras.

Essa técnica estatística constitui-se como ferramenta que demonstra quais tendências, relações e padrões podem estar ocultos em uma coleção de dados em análise. Construir a ACP remete a estudar as similaridades dos sistemas de tratamento avaliados vendo como os dados abarcados pela ACP traduzem a realidade geral.

BROOKS *et al.* (2013) e GAO *et al.* (2009) levantam questões quanto à robustez da ACP quando há dúvida sobre a existência de *outliers* dos dados originais, porém expressam que há robustez.

Na presente pesquisa optou-se pela aplicação da ACP pelo fato de existir resultados já consagrados de trabalhos onde o fundamento parte do uso desta técnica e pela confiança nos dados à disposição.

Os dados fundamentais dos quais foram avaliadas a distribuição e a frequência foram estudados através de ACP com auxílio do programa Matlab 7.9.0 R2009b (MATHWORKS, 2009), a fim de analisar a consistência dos dados, mas já com interface com a verificação do desempenho das estações. As ACP foram feitas mês a mês para os doze meses de cada ano com o propósito de identificar e discutir particularidades de cada estação quanto aos dados que serviram de base para obtenção dos indicadores. Foram obtidas as medianas dos parâmetros que consistem nos dados fundamentais para cada dia dos anos de 2011 e 2012.

A defasagem de dados do parâmetro cor da água tratada impediu a geração de imagem das componentes principais para alguns meses em função de o Matlab 7.9.0 R2009b (MATHWORKS, 2009) não processar quando há defasagem significativa de dados em determinada linha ou coluna. Entretanto, de modo a contemplar o máximo de informação, os meses em que os dados ausentes de cor da água tratada inviabilizaram a ACP foram analisados uma vez sem a coluna dos dados de cor de água tratada na matriz de dados e outra sem as linhas de dados ausentes do mesmo parâmetro.

Assim sendo, para efeito de estudar os dados fundamentais por aplicação de ACP, foram geradas 84 imagens que expuseram informações que possibilitaram considerações e conhecimento sobre as amostras disponíveis. Comprovada a consistência dos dados passou-se ao desenvolvimento do sistema de indicadores propriamente dito.

### **4.3 Cálculo e análises dos indicadores propostos**

Foram construídas planilhas de Excel 2010 (MICROSOFT, 2010) com dados operacionais dos anos de 2011 e 2012 com células referenciadas nas planilhas de relatório diário. Obteve-se uma planilha de cada indicador para cada uma das cinco estações amostradas, totalizando 65 planilhas.

Os indicadores foram calculados no Excel utilizando as funções CONT.SE que contabiliza células que contêm valores em condição específica (maior que, menor que, igual a); CONT.NUM que contabiliza somente as células cujo conteúdo é um número (para saber o total de amostras anotadas); CONT.VAZIO que contabiliza as células vazias (para saber o números de amostras não anotadas); outras fórmulas que estabeleçam condição específica a satisfazer; MED para cálculo de

medianas; QUARTIL.EXC para identificar determinados valores dentro da faixa de maiores valores de turbidez da água bruta e outras expressões básicas de somatório e cálculo de percentuais.

Na fase seguinte o interesse foi exatamente cumprir o objetivo de analisar o desempenho sendo que existiam indicadores com especificidades diferentes. Por isso, os indicadores por sua própria natureza foram classificados em duas categorias: Indicadores de Resultado (IR) e Indicadores de Causa (IC). O conjunto IR levou ao cálculo do IDO – Índice de Desempenho Operacional por somatório dos *scores* e o conjunto de IC ao cálculo do ISO – Índice de Sobrecarga Operacional. E ainda, por critério de relevância em referência à Portaria 2914/2011, a alguns indicadores foi atribuído peso 2 e a outros, peso 1.

Foram construídas as planilhas com o resultado dos cálculos dos indicadores para as cinco estações amostradas com células referenciadas nas planilhas obtidas a partir dos relatórios diários. Os resultados foram consolidados numa planilha com as médias dos dois anos, 2011 e 2012. A seguir foram desenvolvidas análises estatísticas e obtida a hierarquização das estações segundo o IDO e o ISO.

A utilização dos testes estatísticos está inserida na aplicação de análise exploratória que consiste na obtenção e extração de informações de um determinado conjunto de dados, na qual, através das próprias operações aplicadas para a análise exploratória, é feita a organização dos conjuntos de dados (MATOS et al., 2003). Esse conjunto de dados deve ser tão grande quanto possível e necessário de modo a abarcar todos os elementos substanciais no interesse da pesquisa em desenvolvimento. A análise exploratória será univariada, bivariada ou multivariada com atenção nessa pesquisa às análises bivariada e multivariada.

Análises bivariadas medem a correlação na associação entre todos os pares de variáveis (GUPTA et al., 2012). A análise de correlação é uma ferramenta importante para as diferentes áreas do conhecimento, não somente como resultado final, mas como uma das etapas para a utilização de outras técnicas de análise (LIRA e CHAVES NETO, 2006). O cálculo do coeficiente de correlação de Spearman e Kendal Tau são artifícios estatísticos de análise bivariada associada a testes não paramétricos.

Testes paramétricos utilizam parâmetros da distribuição, ou uma estimativa destes, para análise estatística, são normalmente mais rigorosos e necessitam mais pressuposições para validação. Por outro lado, os testes não paramétricos utilizam na análise estatística postos atribuídos aos dados



ordenados e são livres da distribuição de probabilidades dos dados estudados (REIS e JÚNIOR, 2007).

A aleatoriedade dos dados de estações de tratamento de água (caracterizados como naturais ou ambientais) está sujeita não somente à leitura das medidas. A origem da formação dos dados também é aleatória; existe método padrão para coleta de amostras e leitura, porém a formação das amostras acontece de forma não premeditada, assim, em função da natureza dos dados estudados e verificada a distribuição, são recomendados testes não paramétricos na análise estatística bivariada.

Para análise bivariada foi aplicado o Coeficiente de Correlação de Spearman e Correlação Kendall Tau, testados para nível de confiança de 95% a fim de analisar a correlação entre os indicadores. A aplicação desta metodologia foi feita utilizando a ferramenta Statistica 7.0 (STATSOFT, 2007).

A partir disso definiu-se a hierarquização das estações de tratamento de água pelo desempenho puro e simples sem qualquer análise de relevância maior de um indicador em relação ao outro. A soma dos resultados percentuais obtidos pelas fórmulas de cada indicador implicou nessa hierarquização, sendo feita assim para obter uma análise inicial da representatividade dos indicadores no sistema.

Depois foi verificado o estabelecimento de pesos considerando a relevância; peso 1 ou 2, para determinados indicadores e visto como isso influenciou no sistema de indicadores. Os resultados dos percentuais somados obtidos pelas fórmulas de cada indicador com a incidência dos pesos implicaram nessa hierarquização. O critério para atribuição dos pesos foi definido pela coincidência dos indicadores com a Portaria 2914/2011 a fim de destacá-los no caso dos IR, e pela correlação direta com os parâmetros de água tratada que consiste na parcela mais nobre quanto à medida de desempenho, no caso dos IC.

E ainda; foram analisadas hierarquizações segundo alguns indicadores que pela sua importância talvez pudessem por si só explicar ou determinar a hierarquização das estações de tratamento de água. Os resultados dos percentuais obtidos pelas fórmulas de determinado indicador implicaram nesta hierarquização. Feito assim para confirmar se existe de fato a necessidade real de lançar mão de um sistema de indicadores para medir o desempenho ou se somente um indicador traz todas as respostas almejadas. Ou seja, não é desejável que o grupo de indicadores esteja além do necessário, porém, é primordial que não esteja aquém de fornecer respostas concretas.

Por fim, para buscar maior consistência da proposta dos indicadores, fez-se também a aplicação de análise multivariada para esclarecimento sobre as variáveis-chave que influenciam o desempenho das estações. Análises multivariadas avaliam as interações globais de qualquer conjunto de variáveis (GUPTA *et al.*, 2012).

Para análise multivariada foi construída matriz com todos os resultados de cálculo dos indicadores para os anos de 2011 e 2012 e, a partir do uso da ferramenta Matlab (MATHWORKS, 2009), foi gerada imagem gráfica de componentes principais a fim de reconhecer eventuais sobreposições dos indicadores e a influência estatística maior ou menor deles. Também através da ACP foi possível perceber comparativamente a alocação das estações no campo gráfico e obter informações sobre as particularidades de cada estação e demais informações, inicialmente ocultas, sobre as influências que as variáveis/indicadores exercem no desempenho de cada estação de tratamento de água.

## 5. DISCUSSÃO E RESULTADOS

### 5.1 Caracterização das estações de tratamento de água

A pesquisa foi desenvolvida a partir da necessidade de verificação das condições operacionais das estações convencionais de tratamento de água amostradas. Cada indicador é relativo a uma ou mais das múltiplas etapas caracterizadas no tratamento convencional e esclareceu eventuais gargalos na melhoria do desempenho das estações. Somado a isso, através da aplicação do sistema com todos os indicadores propostos foi possível hierarquizar as cinco estações de tratamento de água.

Algumas características das cinco estações, cujas captações ocorrem por meio de barragem de nível, para as quais foram aplicados os indicadores de desempenho propostos estão apresentadas na Tabela 1. As sobrecargas estão caracterizadas para cada estação logo em seguida (Figura 3; Figura 3; Figura 4; Figura 5; Figura 6). Em todas as estações faz-se correção de pH com geocálcio para contribuir com a coagulação e a desinfecção é por aplicação de Hipoclorito de Sódio.

Tabela 1: Características de projeto das estações de tratamento amostradas

Unidade	ETA I	ETA II	ETA III**	ETA IV**	ETA V
Pré-tratamento	Não	Caixa de areia	Não	Não	Pré-cloração
Adução	Recalque	Recalque	Gravidade	Recalque	Gravidade
Mistura rápida	Medidor Parshall	Medidor Parshall	Medidor Parshall	Medidor Parshall	Medidor Parshall
Floculador	Bandejas perfuradas	Alabama	Alabama	Bandejas perfuradas	Alabama
Decantador	Alta taxa	Alta taxa	Escoamento horizontal	Alta taxa	Escoamento horizontal
Filtros rápidos	Dupla camada	Dupla camada	Camada simples	Dupla camada	Camada simples
Operação					
Vazão Nominal (l/s)	20	60	50	60	36
Coagulante*	Cloreto de polialumínio Sulfato de Alumínio	Cloreto de polialumínio Sulfato de Alumínio	Cloreto de polialumínio Sulfato de Alumínio	Cloreto de polialumínio Sulfato de Alumínio	Cloreto de polialumínio Sulfato de Alumínio

\* Há alternância na espécie de coagulante usada no tratamento

\*\*O uso do coagulante pode eventualmente ser suspenso devido à qualidade do manancial. Águas de mananciais bem preservados sem agravantes de concentração de sólidos suspensos, ou seja, com pouca variabilidade de turbidez da água bruta no decorrer dos períodos secos, não exige a coagulação química para tratamento. Neste caso somente filtração e desinfecção eficientes são suficientes para obtenção de água dentro dos padrões de potabilidade.

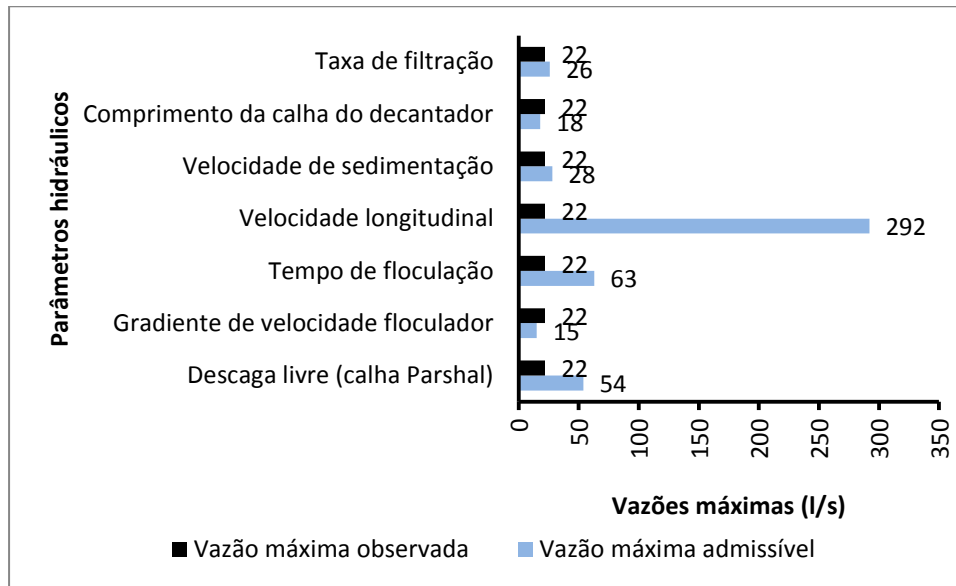
Fonte: o Autor

A sobrecarga a que as estações de tratamento de água podem estar submetidas pode ser caracterizada em termos de vazão de operação, em função da tratabilidade da água afluyente, ou pode ser avaliada também a partir da verificação dos parâmetros hidráulicos específicos de cada unidade do tratamento convencional. Vale lembrar que a sobrecarga que fundamenta a concepção dos indicadores dessa pesquisa foi caracterizada em termos gerais, ou seja, em função da vazão nominal indicada no projeto das estações de tratamento amostradas e da tratabilidade da água afluyente à estação no que se refere ao parâmetro turbidez.

Entretanto, foi importante um argumento mais específico no sentido de constatação da sobrecarga. Para isso fez uma avaliação das vazões máximas permissíveis das unidades de tratamento que compõem as estações de tratamento amostradas com base nos parâmetros hidráulicos que puderam ser levantados a partir das dimensões de projeto, verificadas em campo ou lidas em algumas plantas às quais foi permitido acesso no acervo da autarquia.

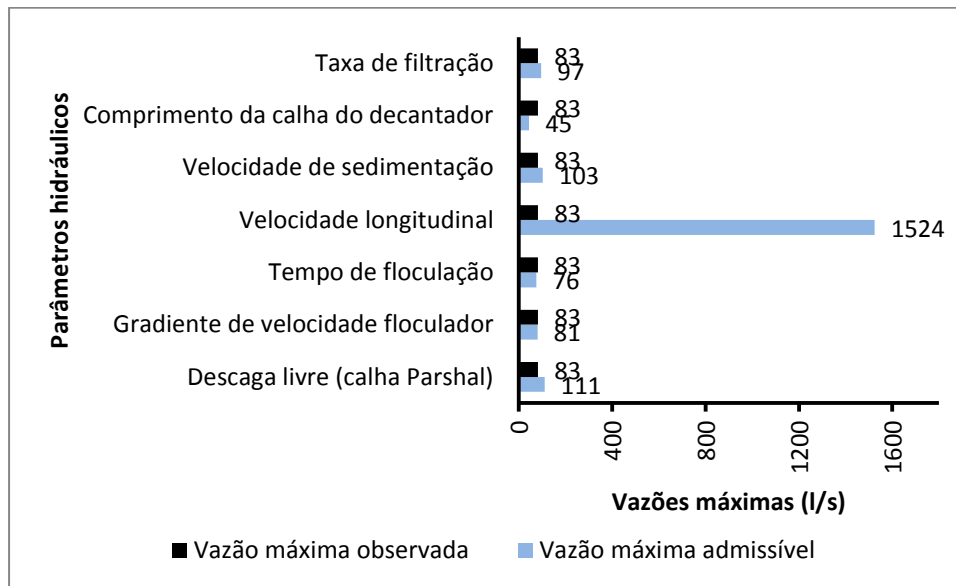
A sobrecarga pode ser diagnosticada a partir das referências da NBR 12216 que trata do dimensionamento de estações convencionais de tratamento de água. As avaliações estão demonstradas em gráficos (Figura 3; Figura 3; Figura 4; Figura 5; Figura 6) os quais comparam as vazões máximas permissíveis de acordo com cada parâmetro hidráulico com a máxima vazão observada nos relatórios diários para cada uma das estações. A partir dos gráficos o argumento de sobrecarga pode ser confirmado. A frequência de ocorrência de sobrecarga está aferida pelos indicadores de desempenho ora propostos.

Figura 2: Verificação de sobrecarga da ETA I para máxima vazão afluyente



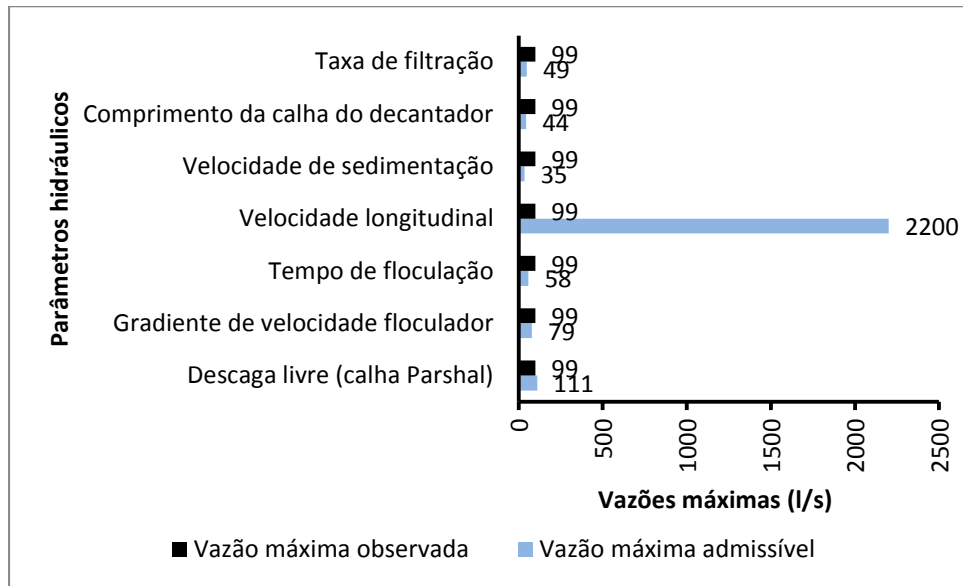
Fonte: o autor

Figura 3: Verificação de sobrecarga da ETAlI para máxima vazão afluyente



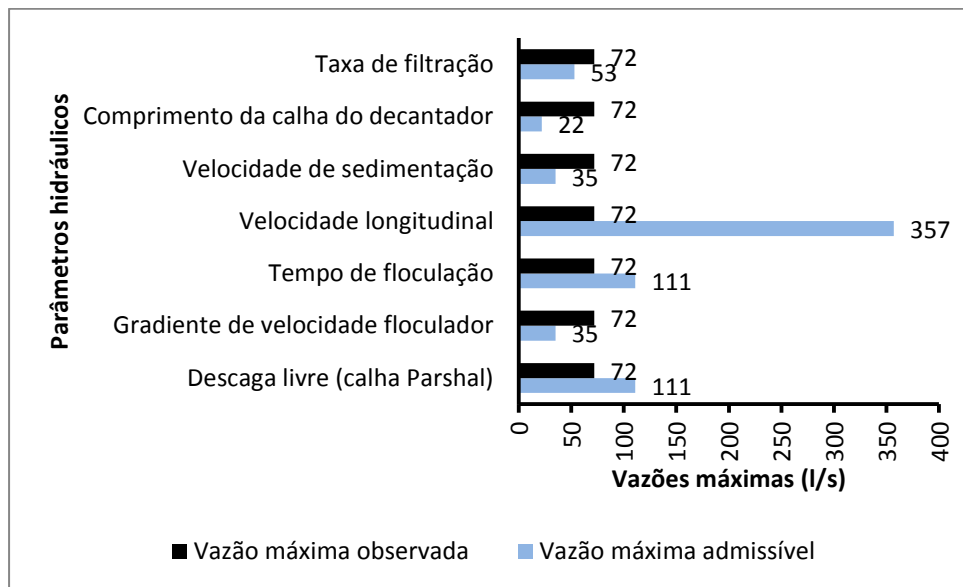
Fonte: o autor

Figura 4: Verificação de sobrecarga da ETA III para máxima vazão afluyente



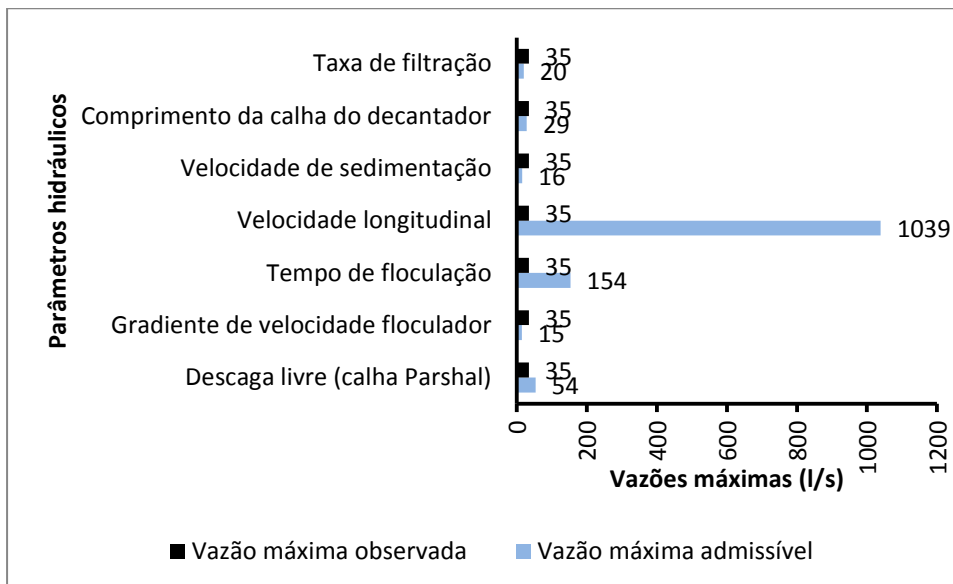
Fonte: o autor

Figura 5: Verificação de sobrecarga da ETA IV para máxima vazão afluyente



Fonte: o autor

Figura 6: Verificação de sobrecarga da ETA V para máxima vazão afluyente



Fonte: o autor

## 5.2 Definição e justificativa dos indicadores

Os indicadores propostos não são diretamente econômicos ou ambientais, mas voltados para a verificação da tratabilidade da água afluyente às estações e, por consequência, para atendimento dos padrões de potabilidade ou de metas de qualidade mais estritas estabelecidas pelos próprios prestadores de serviço. A aplicação do sistema de indicadores promoveu a oportunidade de identificar as deficiências e, a partir disso, será possível planejar a alocação de recursos para melhorias estruturais no conjunto de unidades de tratamento e eventuais ajustes nos procedimentos operacionais.

De um modo geral todos os envolvidos nas análises de resultado de desempenho das estações de tratamento de água estão interessados no fornecimento de água de qualidade para o consumidor, porém, identifica-se que a visão das agências reguladoras e vigilância sanitária são inclinadas quase que exclusivamente ao resultado no atendimento dos padrões. Desta forma diferencia-se a visão de prestador de serviço que deve ser voltada para a melhoria do desempenho a partir da investigação das causas para desempenhos não satisfatórios, para evolução das tecnologias de tratamento e para manutenção das estruturas em operação.

A proposição dos indicadores destacou o parâmetro turbidez, crucial na potabilização. A redução da turbidez para níveis menores que 0,5 uT (BRASIL, 2011) consiste em relevante garantia de que a água disponibilizada para o abastecimento pode ser consumida com maior segurança. Entretanto, sabe-se que o resultado da análise de turbidez não consiste no único parâmetro de referência para classificação da água como potável.

O parâmetro turbidez dentro do fluxograma do tratamento tipo convencional é determinante para definir o sucesso do tratamento tendo ainda relação intrínseca com os parâmetros microbiológicos igualmente importantes. Removida a turbidez diminui-se significativamente o potencial de contaminação microbiológica, inclusive por cistos e oocistos de protozoários.

A própria definição dos indicadores justificou a representatividade dos mesmos para as diretrizes de gestão e tomada de decisão. Alguns dos indicadores propostos demonstraram o desempenho de forma direta e outros são correlatos a fatores que interferem ou explicam o desempenho.

Conforme mencionado na Metodologia, os indicadores foram então categorizados em *IR* – *Indicadores de resultado*, que demonstram o desempenho dos sistemas de forma direta e *IC* – *Indicadores de Causa*, que consistem em informação sobre as condições operacionais que possam estar interferindo no desempenho das estações convencionais de tratamento de água. A seguir são apresentados os indicadores propostos com suas respectivas nomenclaturas, as definições, os conceitos e as especificidades técnicas que os fundamentam.

#### **IR01 – Percentual de amostras com cor aparente da água tratada inferior a 15 uC.**

Indicador do desempenho para o que é preconizado pela Portaria 2914/2011. Resultado insatisfatório na remoção de cor requer:

1. Análise da água tratada para determinação da cor verdadeira e comparação com a cor aparente;
2. Verificação de eficiência do pré-tratamento quando houver;
3. Verificação do processo de coagulação química quanto às dosagens e à espécie de coagulante, além da frequência e operacionalização dos ensaios de *Jar Test*;
4. Análise de ferro e manganês.



Os itens acima são intrínsecos ao resultado do pré-tratamento da água bruta (se houver) e do processo de clarificação (coagulação, floculação e decantação).

A determinação de cor verdadeira permite identificar a eficiência da coagulação química e a diferença para a medida de cor aparente indica: primeiro, a parcela da cor devida às partículas suspensas e, segundo, se a floculação, decantação e filtração foram satisfatórias.

Como é esperado o mínimo de turbidez na água tratada, a cor aparente da água tratada e a cor verdadeira da água tratada devem tender à igualdade, então, diferenças significativas podem ser decorrentes de problemas hidráulicos da estação. Por outro lado, caso esses parâmetros tendam à igualdade, mas sejam verificados percentuais baixos de sucesso na remoção de cor, identifica-se deficiência na coagulação química ou a tratabilidade da água afluenta à estação foi diminuída por algum motivo (por exemplo: despejos industriais, atividade mineradora clandestina ou processo erosivo de encostas).

Sendo bem executados os procedimentos de definição e aplicação das dosagens de coagulante químico, constatados percentuais baixos do indicador *IR01* e sendo similares os valores de cor verdadeira e cor aparente, é possível confirmar a hipótese de que as características da água bruta são determinantes para o insucesso e, portanto, faz-se necessário pré-tratamento da água bruta com utilização de aeração, pré-cloração, mecanismos de adsorção em meio suporte.

#### **IR02 – Percentual de amostras de água filtrada com ausência de coliformes totais.**

Indicador do desempenho para o que é preconizado pela Portaria 2914/2011. A premissa para o padrão nacional estabelece que o efluente na saída das estações de tratamento de água para a distribuição, bem como amostras de água de qualquer ponto do sistema de distribuição, deve ser isento de coliformes totais. Na ocorrência de resultados deste indicador diferente de 100%, ou seja, na ocorrência de coliformes totais, deve ser feita:

1. Análise de correlação com a turbidez da água tratada;
2. Averiguação dos mecanismos e procedimentos de dosagem de desinfetante, inclusive análise de cloro residual livre;
3. Análise rigorosa da qualidade da água bruta, especificamente no que concerne a concentração de *E. coli*.

De maneira mais específica, caso a água tratada não atinja 100% para este indicador, deve ser pontuado o seguinte:

1. Turbidez da água tratada inferior a 0,5 uT, conclui-se que o insucesso do tratamento é decorrente da deficiência da desinfecção;
2. Caso não haja resultado satisfatório de turbidez tratada conclui-se pela existência de fator que interferiu (efeito escudo) prejudicando a eficiência da desinfecção;
3. Estando adequada a desinfecção e sendo satisfatórios os resultados dos indicadores correlacionados à turbidez da água tratada, conclui-se que a qualidade da água bruta pode ter sofrido alterações significativas fazendo com que a capacidade de remoção ou inativação de agentes microbiológicos pela estação ficou comprometida.

### **IR03 – Percentual de amostras da água tratada com turbidez inferior a 0,5 uT**

Indicador do desempenho para o que é preconizado pela Portaria 2914/2011 (BRASIL, 2011). A remoção da turbidez e consequente diminuição de risco microbiológico é objetivo primário do tratamento convencional. Esse parâmetro não é uma variável que está explícita no dimensionamento das estações de tratamento de água, entretanto os princípios fundamentais da floculação, sedimentação e filtração são afins à remoção de turbidez. Gradientes de velocidade, peso e tamanho dos flocos e velocidade de sedimentação são algumas das grandezas importantes que se correlacionam com as operações unitárias do tratamento de água.

O risco de uma desinfecção deficiente pode ser diminuído por remoção de turbidez que atenda aos padrões previstos na legislação, porém a remoção deficiente da turbidez torna a água tratada vulnerável, mesmo considerando procedimento adequado na desinfecção, pelo fato da turbidez água tratada elevada potencializar o efeito escudo que impede que os microrganismos encrustados nas partículas suspensas sofram ação do desinfetante.

O parâmetro turbidez da água filtrada tem transcendido o aspecto estético a ela associado sendo considerado um dos principais parâmetros do desempenho das estações de tratamento (LIBÂNIO, 2005), senão o mais importante no caso de água para consumo humano. O insucesso da remoção da turbidez remete à verificação de toda a rotina operacional.

O indicador *IR-03* tem conceito tal qual a definição expressa pela Portaria 2914/2011 (BRASIL, 2011), mas a presente pesquisa propôs extrapolar essa prerrogativa e analisar turbidez em

condições específicas de vazão maior que a nominal, de turbidez da água bruta elevada e quanto à eficiência das unidades de floculação e decantação. Deu-se origem a outros indicadores que serão apresentados a seguir, propostos para contribuir para verificação da rotina operacional, análise de subdimensionamento e medição da robustez da estação para essas condições específicas.

**IR04 – Percentual de amostras com turbidez da água tratada inferior a 0,5 uT quando os filtros operaram com taxa de filtração superior à estabelecida pela NBR 12216.**

Trata-se de indicador do desempenho com referência ao que é preconizado pela Portaria 2914/2011 (BRASIL, 2011) analisado o parâmetro turbidez em situação específica que caracteriza possível tolerância quanto à elevação da taxa de filtração.

De acordo com a NBR 12216 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) a taxa de filtração a ser adotada é determinada por meio de filtro-piloto operado com a água a ser filtrada, com camada filtrante igual à dos filtros a serem construídos. Não sendo possível a execução de testes em filtros-piloto as máximas taxas de filtração recomendadas são  $180 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$  para filtros de fluxo descendente de camada simples de areia e  $360 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$  para filtros de fluxo descendente de camada dupla de areia e antracito. Para filtros de fluxo ascendente a taxa recomendada é  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$ .

A taxa de filtração de operação relaciona-se com os resultados de turbidez da água tratada. Esse indicador traduz os seguintes contextos operacionais:

1. Taxa de filtração condizente com a norma e resultados não satisfatórios de turbidez da água tratada demonstram insucesso da clarificação, ou extrapolação da condição limite para turbidez tratável da água bruta, ou ainda, desajuste entre as camadas de meio suporte e meio filtrante, vencimento do tempo de vida útil do meio filtrante, constatação de perda de meio filtrante;
2. Ocorrência do resultado de turbidez tratada satisfatório, mesmo com taxa de filtração maior que a recomendada pela NBR 12216, caracteriza a capacidade dos filtros para operar com sobrecargas;
3. Ocorrência do resultado de turbidez tratada não satisfatório sendo a taxa de filtração maior que a recomendada pela NBR 12216, implica avaliação da clarificação e, tendo ocorrido sucesso da clarificação, conclui-se a extrapolação do limite operacional dos filtros.

Este indicador tem correlação conceitual importante com os indicadores *IC01* e *IC02* que serão apresentados oportunamente. Considerando-os, chega-se à conclusão de que a condição operacional de sobrecarga na estação pode ser contornada pela regularidade na execução de retrolavagens, retirada e recuperação do material filtrante, substituição do material filtrante ou mudança da configuração do meio filtrante de camada simples para camada dupla.

**IR05 – Percentual de valores da turbidez efluente inferior a 0,5 uT quando ocorre elevada turbidez da água bruta.**

Também é indicador diretamente proporcional ao desempenho relacionado ao preconizado pela Portaria 2914/2011 sendo baseado em dados analisados em condição específica de alta turbidez da água bruta. Mede o quanto a estação é robusta para o atendimento dos padrões nesta condição. Adotou-se como valores elevados de turbidez da água bruta os pertencentes ao quarto quartil dos dados dos relatórios diários para este parâmetro.

Os parâmetros hidráulicos têm peso muito significativo no dimensionamento das estações de tratamento de água, contudo a qualidade da água bruta influencia sobremaneira o funcionamento da estação e o sucesso do tratamento. A turbidez da água bruta interage com o resultado de todo o conjunto de unidades de tratamento, porém no caso específico de turbidez elevada da água bruta o indicador IR-05 sugere olhar crítico para a clarificação.

Medir o desempenho em situação específica de alta turbidez da água bruta significa tentar preencher uma lacuna de dimensionamento com a estação em funcionamento. Sabendo que o desempenho da estação está condicionado a variáveis hidráulicas, operacionais e de qualidade de água bruta, é possível trabalhar as variáveis de forma iterativa de modo a melhorar o desempenho.

O desempenho insuficiente para o parâmetro turbidez da água tratada, considerando condições de alta turbidez da água bruta, pode culminar até com a interrupção do abastecimento ou com fornecimento de água em condições inadequadas. Entretanto, dentro da programação operacional, a interação das variáveis citadas deve ser prevista. A interação passa por execução de *Jar Test* e ajuste da vazão afluente visando o sucesso da clarificação.

Cabe mencionar algumas hipóteses:

1. Resultados nulos para o indicador *IR05* apontam condição de turbidez da água bruta elevada não tratável se mantido o padrão operacional em curso. Deve-se ajustar a vazão afluyente e realizar *Jar Test* para analisar a tratabilidade;
2. Resultados para o indicador *IR05* significativamente diferentes de 0% demonstram o potencial da estação em obter sucesso na condição específica e são necessários ajustes com auxílio do *Jar Test* para propiciar melhor resultado da clarificação e o sucesso pleno;
3. Resultados para o indicador *IR05* próximos de 100% ou 100% demonstram o sucesso no desempenho da estação facilitado pela tratabilidade da água. Sendo muito próximo de 100%, caso tenha sido constatado o sucesso da clarificação, conclui-se que existe algum desajuste no filtro que pode ter ocorrido pontualmente ou está sendo desencadeado, ou considera-se algum desajuste operacional pontual na clarificação que impediu o sucesso total.

#### **IR06 – Percentual de amostras com turbidez da água decantada inferior a 2uT.**

É indicador diretamente proporcional ao desempenho à medida que a clarificação deve viabilizar condições de água tratável afluyente aos filtros. Considerando que é difícil estabelecer padrão para máxima turbidez da água decantada, adotou-se a recomendação norte-americana como balizadora do indicador (2 uT). Cabe ressaltar que para estações às quais aflui água bruta de turbidez elevada (superior a 100 uT), efluente inferior a 5 uT indica eficiência na decantação (LIBÂNIO, 2005).

Este indicador não é determinante para definir ajustes na estrutura dos decantadores até porque essas unidades são limitadas em permitir modificações na sua estrutura, entretanto, operacionalmente tem valor importante. Pode ser limitador do potencial da estação operar com vazões maiores que a nominal. Valores significativamente superiores à referência projetam defasagem na clarificação, ou seja, põem em dúvida a rotina de descargas do decantador, a floculação e a coagulação, e ainda, fazem necessária a verificação dos gradientes de velocidade nas etapas de clarificação.

O vínculo operacional deste indicador com os filtros é a carreira de filtração. Insucesso da clarificação implica carreiras de filtração mais curtas. Rotina operacional não ajustada à necessidade de execução mais frequente de retrolavagens é razão da colmatação dos filtros, do traspasse e da elevação da turbidez da água tratada.

### **IR07 – Turbidez da água tratada inferior a 0,5 uT quando a razão entre a vazão afluyente e a vazão nominal é maior que 1**

Este indicador destaca os pontos mais importantes deste trabalho, a sobrecarga em relação à vazão nominal e o parâmetro turbidez. É indicador diretamente proporcional ao desempenho da estação de tratamento de água e as conclusões decorrentes do seu resultado são a seguir apresentadas.

1. Se o desempenho é totalmente satisfatório a estação não encontrou problemas para trabalhar com sobrecarga. A magnitude da vazão para a qual a ETA é robusta para atendimento do padrão turbidez da água tratada será dada pela máxima vazão de operação registrada nos relatórios de monitoramento;
2. Obtido sucesso parcial significa que deve ser verificada a rotina operacional, aplicados ensaios de *Jar Test* e apontado o momento do resultado satisfatório. Devem ser levantados aspectos da qualidade da água bruta nesse instante de modo a precisar as condições que favoreceram o enquadramento dentro do padrão da portaria 2914/2011 para a turbidez da água tratada.
3. O total insucesso deve levar ao redimensionamento e investigação dos limites operacionais da estação considerando o projeto hidráulico e a variabilidade da qualidade da água bruta.

Cabe observar que cada estação em função das características da água bruta e do projeto hidráulico poderá ser robusta para diferente magnitude de vazão operacional em relação à vazão nominal se comparada a outras estações de tratamento.

### **IC01 – Percentual de horas de funcionamento da estação que os filtros operaram com taxa de filtração superior à estabelecida pela NBR 12216.**

Indicador de fator que interfere no desempenho e descreve a condição de operação a que os filtros estiveram submetidos. Acredita-se que haja limite operacional acima do recomendado pela NBR 12216. O limite operacional real é influenciado pela qualidade da água bruta, pelo sucesso da clarificação e pela adequada operacionalização.

Não é indicador de destaque individualmente, mas dentro do sistema proposto correlaciona-se com Indicadores de Resultado quais sejam, IR01, IR02, IR03, IR04, IR05 e IR07, especificados anteriormente. Analisar as interfaces conceituais com estes outros indicadores contribuiu para a avaliação do desempenho da estação.

## **IC02 – Razão entre a mediana das taxas de filtração reais e a taxa de filtração de norma - NBR 12216.**

Nenhum dos indicadores aqui propostos levou em consideração as investigações preliminares que foram talvez executadas no momento de concepção e projeto das estações de tratamento de água, isso porque, quanto às estações amostradas, esses dados não estiveram disponíveis. Parte-se, portanto, da suposição de que estas informações não estão acessíveis. Está sendo discutida a ocorrência do sucesso do tratamento considerando aspectos da NBR 12216 e as condições operacionais a que as estações de tratamento estiveram submetidas no decorrer de sua operação.

Entretanto, pontuando que eventualmente os filtros foram submetidos a ensaios de taxa de filtração e estejam disponíveis relatórios ou registros disto, este indicador, aliado à verificação do indicador IR04, poderá atestar a capacidade de operação em termos de taxa de filtração, inclusive, confirmar o ensaio piloto.

Por outro lado, se a taxa de filtração aplicada não é condizente com a capacidade do filtro, o indicador expressa fator de interferência no desempenho. Considera-se a magnitude da taxa de filtração de operação em relação às taxas indicadas na NBR 12216 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) porque prevê os limites operacionais usuais, caso os relatórios de ensaio piloto não estejam acessíveis, são limites operacionais aceitáveis para referência. Usualmente este indicador pode ser determinado com frequência horária, compatível ao registro da vazão afluente à estação.

É indicador correlato ao projeto hidráulico da estação e, quanto maior a razão, maior a importância deste item em termos de previsão do limite operacional. A equação da continuidade está implícita em todo escoamento na estação de tratamento de água e a elevação da taxa de filtração em relação ao recomendado pela NBR 12216 podem implicar em situações diferentes da prevista no projeto hidráulico dos filtros, porém o sucesso do tratamento pode ocorrer se a sobrecarga nos filtros for atenuada por uma clarificação eficiente.

A taxa de filtração a ser adotada deve ser determinada por meio de filtro-piloto; não havendo ensaios, as taxas máximas devem ser de 180 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/dia para camada simples de leito filtrante e 360 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/dia para camada dupla (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), isso no caso de filtros rápidos de fluxo descendentes, unidades características de estações de

tratamento do tipo convencional. Para a maioria das estações de tratamento de água construídas no Brasil não foram feitas experiências em filtro-piloto.

Propõe-se a mediana porque seu valor, pelo próprio conceito, ao mesmo tempo baliza a distribuição de dados numéricos num valor central e afasta-se menos dos valores de taxas de filtração de maior frequência de ocorrência (moda) em relação à média aritmética, isso proporciona maior confiança para a avaliação da magnitude da taxa de filtração operacional, ou seja, a mediana sofre menor influência de valores extremos em relação à média.

### **IC03 – Razão entre a mediana da turbidez da água tratada e o valor de referência 0,5 uT.**

Trata-se de indicador que exprime o quanto o resultado do desempenho no atendimento do padrão turbidez da água tratada está aquém da meta. Com vistas ao atendimento do padrão de potabilidade da Portaria 2914/2011 (BRASIL, 2011), espera-se que a razão expressada pelo indicador seja menor ou igual à unidade. Individualmente pode ser adotado como uma medida de eficiência de todo o conjunto de unidades de tratamento.

O indicador é diretamente relacionado com o indicador IR-03 que corrobora com a premissa do atendimento dos padrões estabelecidos por lei. Porém, a partir da conclusão de um desempenho insatisfatório, ou seja, razão maior que a unidade, a magnitude da razão pode ser analisada por um ângulo diferente.

Esse outro ângulo consiste na avaliação do desempenho da estação quando existe significativo número de fatores que tendem a implicar o resultado de forma negativa. Isso leva a concluir sobre o potencial da estação em tratar operando em condições precárias com sobrecarga e/ou sem arranjo operacional adequado.

A magnitude próxima da unidade fornece informação de que a estação pode ser robusta para alcançar resultado satisfatório, por outro lado, sendo muito maior que a unidade indica que não é robusta ou que as condições operacionais não oportunizam qualquer possibilidade de desempenho satisfatório.

O indicador IC03 é uma informação que tende ser objetiva sobre desempenho, porém não foi considerado Indicador de Resultado pelo fato de não ser uma medida clara do alcance de sucesso no atendimento do padrão turbidez da água tratada em relação à quantidade de amostras



observadas. Trata-se de indicador proposto para comparação com lógica de análise inversa àquelas proporcionada pelos IR.

A quantificação do sucesso de atendimento dos padrões avaliados nessa pesquisa é característica exclusiva atribuída aos IR. Analiticamente o IC03 tem desdobramentos afins à identificação de situações que possam ter influenciado o desempenho. A magnitude menor ou maior possibilita esclarecimento sobre condições operacionais e robustez, conforme mencionado. Sendo assim, a verificação da magnitude está mais inclinada à discussão do insucesso e não do sucesso operacional da estação de tratamento avaliada.

#### **IC04 – Razão entre a mediana da turbidez decantada e mediana da turbidez tratada.**

Indicador que permite uma avaliação individualizada da filtração e contribui para a explicação do desempenho geral da estação. Considera-se que:

1. Quanto maior a razão conclui-se que as unidades de filtração cumprem a função efetivamente e analisada a correlação principalmente com o indicador *IR-03* tem-se dimensão do potencial dos filtros para corrigir o desempenho das outras etapas do tratamento;
2. Caso tenha ocorrido o atendimento dos padrões de turbidez tratada, sendo a razão que define o indicador *IC04* próxima da unidade, demonstra-se que o manancial é de excelente qualidade ou que o sucesso da clarificação exigiu pouco da filtração. Do contrário, o não atendimento do padrão de turbidez, ainda que seja a razão que define o indicador *IC04* próxima à unidade, demonstra a inoperância dos filtros.
3. Razão menor que a unidade indica traspasse e/ou suspensão de sólidos que possam estar depositados no tanque de contato, o que implica padrão operacional inadequado sendo necessário verificar a rotina de retrolavagens e análise da vida útil do material filtrante e da estrutura dos filtros.

#### **IC05 – Percentual de horas por ano que a estação de tratamento operou com vazão maior que a vazão de projeto.**

Indicador que expressa condição que pode ou não afetar o desempenho. De fato, pode não ser determinante para desempenho ruim da estação de tratamento, entretanto a condição de vazão maior que a nominal está além da previsão de sucesso do tratamento avaliada no projeto.

Colocar uma estação de tratamento para operar em sobrecarga afeta todo conjunto de unidades, sem exceção. A alteração dos gradientes de velocidade para limites além do especificado pela NBR 12216 consiste em possibilidade de insucesso no tratamento devido configurar desconformidade com o projeto hidráulico da estação. Entretanto, a qualidade da água bruta e a adequada operação são diferenciais no resultado final do tratamento. Assim, mesmo os limites de gradiente de velocidade sendo extrapolados, determinada unidade do sistema pode compensar a deficiência das etapas anteriores.

Individualmente este indicador é somente constatação do período de sobrecarga, mas quando analisado junto com o indicador IR-07 possibilita conclusões.

### **IC06 – Irregularidade de frequência de lavagens dos filtros.**

Proposto como parâmetro de regularidade de execução de lavagem dos filtros. Coloca-se como indicador que caracteriza fator que interfere no desempenho da estação de tratamento. O sucesso das etapas do tratamento anteriores ao filtro possibilita avaliar de forma coerente a periodicidade de execução de retrolavagem, mesmo que haja variação moderada da qualidade da água decantada. Com isso é possível expressar a expectativa de gasto percentual com água para lavagem dos filtros.

Libânio (2005) argumentou que problemas como formação de bolas de lama e mesmo sulcos são resultados de sucessivas lavagens ineficazes levando a queda de qualidade do efluente, carreiras de filtração mais curtas e até a substituição do meio filtrante.

Presume-se que, dentre outras razões, as lavagens ineficazes são decorrentes da periodicidade de lavagens, sendo que, encontradas altas defasagens considerando os valores de referência encontrados na literatura para o indicador IC06, há indícios de:

1. Carreiras de filtração excessivamente longas quando o percentual de gasto com água para retrolavagem é significativamente menor;
2. Carreiras de filtração excessivamente curtas quando o percentual de gasto com água para retrolavagem é significativamente maior.

O gasto percentual com água de lavagem é o maior volume de água gasto no processo de tratamento, geralmente de 2% a 5% (RIBEIRO, 2003) do volume de água produzido. A United State Environmental Protection Agency(2002) analisou que esse percentual está compreendido entre 2% e 10%. Esta relação está diretamente relacionada à turbidez afluente aos filtros. A

defasagem de execução de lavagens dos filtros interfere no desempenho da estação. Para referência de cálculo do IC06 foi adotado 5% como expectativa de percentual de gasto com água de lavagem.

Os indicadores que acabam de ser elencados são aqueles que foram viabilizados pelo banco de dados fornecido e foram propostos em quantidade considerada como suficiente para as avaliações pretendidas. Vale registrar que foram definidos outros indicadores que foram inviabilizados pela limitação do banco de dados disponível. São eles:

- **Percentual de valores de turbidez da água filtrada inferior a 0,5 uT para as primeiras amostras após o início da carreira de filtração.**

A finalidade deste indicador consiste em ter informação sob o sucesso da lavagem dos filtros, eventuais anomalias físicas dos filtros e desajustes na operação.

O interesse neste indicador deve-se ao fato de que o filtro é a última barreira física da estação convencional e se ele tiver condições para amortecer os eventuais desajustes das etapas anteriores, o tratamento poderá ter sucesso, embora a estação não esteja sendo completamente eficiente.

Também este indicador aponta a necessidade de reservatório de apoio que armazene água para retrolavagem com maior carga hidráulica do que a fornecida pelos filtros adjacentes ou pelo tanque de chegada de água filtrada. O insucesso na retrolavagem dos filtros pode ser devido à carga hidráulica insuficiente em termos de altura disponível.

- **Percentual de valores de turbidez da água filtrada inferior a 0.5 uT da última amostra após o fim da carreira de filtração.**

Este indicador tem interface com o indicador imediatamente anterior. Presume-se que a última amostra pode fornecer informação sobre a qualidade do controle operacional e, se a operação for eficiente, poderia indicar aproximações de valores de turbidez que determinem o momento de lavagem dos filtros;

- **Turbidez da água decantada imediatamente antes da descarga do decantador.**

Essa medida expressa o esmero operacional. Turbidez decantada muito elevada indica sobrecarga de trabalho dos filtros em termos de qualidade do afluente. O monitoramento deste parâmetro no momento específico expresso na definição do indicador permite a verificação de valores de turbidez que definam o momento de limpeza do decantador.

### 5.3 Consistência dos dados

Passa-se agora para a visualização da caracterização dos dados cuja consistência foi avaliada primeiro com a análise IQ (ver ANEXO I). Descartadas as anotações destacadamente anormais foi verificada grande quantidade de *outliers* e valores extremos para os dados considerados fundamentais para obtenção dos indicadores. Descritivamente os dados se apresentaram conforme Tabela 2.

O número esperado de anotações para cada um dos conjuntos de dados fundamentais, juntando os anos de 2011 e 2012, é 8760 considerando que as estações operem 24 horas por dia. Destaca-se o parâmetro estatístico variância para água bruta da ETA II, 84015.38, que atesta maior variabilidade das condições da água afluenta para esta estação de tratamento de água e a menor variância da água bruta da ETA IV, 82.11. Comparativamente isso implica numa possível facilidade operacional para a ETA IV e dificuldade operacional para a ETA II.

Nota-se uma ordem de grandeza semelhante dos parâmetros estatísticos calculados a partir dos dados de cor da água tratada para as estações ETA I, ETA II e ETA III, sendo que a ETA IV, aparentemente se destaca no tratamento da cor, mas cabe considerar a facilidade operacional dessa estação favorecida pelo manancial.

As conclusões mais relevantes da Tabela 2 são a estabilidade operacional da ETA I dada pela menor variação da vazão operacional, mantendo inclusive menor variação da turbidez da água tratada em relação às demais estações de tratamento; a maior variabilidade da turbidez da água bruta afluenta à ETA II; a facilidade operacional da ETA IV esclarecida pela qualidade do manancial; a maior dificuldade no tratamento da cor pela ETA V caracterizada pela maior variação dos resultados da cor aparente da água tratada em relação às demais estações; e a maior assiduidade nos apontamentos do controle operacional da ETA III esclarecida pela maior quantidade de dados disponíveis em relação às demais estações de tratamento de água amostradas.

Tabela 2: Dados gerais de 2011 e 2012 agrupados.

Sendo: (s): Desvio Padrão, (s<sup>2</sup>): Variância e (CV): Coeficiente de variação.

Parâmetro	Cor aparente da água tratada (uC)	Número de registros	Turbidez da água bruta (uT)	Número de registros	Turbidez da água decantada (uT)	Número de registros	Turbidez da água tratada (uT)	Número de registros	Vazão de operação (l/s)	Número de registros
ETAI										
Mediana	8.50		1.30		1.07		0.72		17.00	
Média	10.66		14.06		4.13		1.17		16.36	
S	8.48	3625	80.69	8245	11.38	8176	1.56	8160	2.10	8319
s <sup>2</sup>	71.93		6511.83		129.56		<b>2.42</b>		<b>4.41</b>	
CV	0.80		5.74		2.76		1.33		0.13	
ETAII										
Mediana	5.50		9.87		2.18		0.77		66.00	
Média	8.32		85.13		3.81		1.47		64.49	
S	7.48	4599	289.84	8184	9.29	8274	7.73	7789	4.56	8272
s <sup>2</sup>	56.03		<b>84015.38</b>		86.32		59.79		20.76	
CV	0.90		3.40		2.44		5.25		0.07	
ETAIII										
Mediana	11.10		0.97		0.98		0.91		86.00	
Média	12.10		2.94		1.83		1.55		84.20	
S	8.94	<b>6267</b>	13.14	<b>8530</b>	5.07	<b>8597</b>	2.02	<b>8564</b>	4.32	<b>8592</b>
s <sup>2</sup>	79.96		172.78		25.67		4.06		18.64	
CV	0.74		4.47		2.77		1.30		0.05	
ETAIV										
Mediana	2.40		0.56		0.56		0.44		63.00	
Média	4.42		2.20		2.17		1.45		59.83	
S	4.00	1904	9.06	7818	8.64	8245	5.16	8242	7.30	8442
s <sup>2</sup>	15.99		<b>82.11</b>		74.65		26.65		53.25	
CV	0.90		4.12		3.99		3.57		0.12	
ETAIV										
Mediana	10.50		5.06		4.34		1.64		19.40	
Média	13.14		46.83		7.92		2.18		19.13	
S	10.18	5151	189.43	7831	10.14	7833	3.21	7830	3.93	7392
s <sup>2</sup>	<b>103.74</b>		35888.94		102.90		10.29		15.46	
CV	0.77		4.05		1.28		1.47		0.21	

Fonte: O autor

Verificou-se menor número de anotações nos relatórios para dados de cor da água tratada. A representatividade amostral (percentual de amostras analisadas em relação à quantidade de amostras requerida) para esse parâmetro variou entre 15% e 84% entre o ano de 2011 e 2012. O parâmetro turbidez da água bruta variou a representatividade amostral entre 82% e 95%. Já o parâmetro turbidez da água decantada variou a representatividade entre 87% e 97%. O parâmetro turbidez da água tratada variou entre 87% e 96% em termos de representatividade amostral e, por último, o parâmetro vazão de operação variou entre 88% e 97%.

Não é adequado desconsiderar que as defasagens possam influenciar o resultado estatístico principalmente na análise do parâmetro cor de água tratada, mas decidiu-se confiar e avaliar o desempenho com base nos dados amostrais disponíveis. Os níveis de representatividade amostral para a maioria dos dados fundamentais foram maiores que 80%, o que possibilita segurança satisfatória para utilizar os dados. É importante frisar que, preferencialmente, um conjunto amostral deve ser completo, por outro lado, cabe considerar a dificuldade de obtenção de dados com as características aqui exploradas.

Na averiguação da distribuição dos dados através de gráficos de frequência (ver ANEXO II) foi confirmada a assimetria negativa dos dados, o que era esperado principalmente para os dados de turbidez da água bruta para as cinco estações. Em particular não se discute a normalidade dos dados de vazão de operação por existir fator não natural ou aleatório que torna irrelevante a discussão da distribuição. Esse fator consiste na decisão e necessidade da vazão com a qual a ETA será operada com vista ao atendimento da demanda que pode aumentar progressivamente ou diminuir eventualmente.

A assimetria negativa para os demais parâmetros chama a atenção, pois nas primeiras barreiras do tratamento considerando a coagulação, floculação e decantação espera-se adequação importante da qualidade da água com redução dos parâmetros para atendimento dos padrões. De certo modo é sugestivo que essa adequação ocorreria de tal forma que configuraria distribuição próxima da normal. Entretanto, a assimetria negativa observada notadamente tendenciosa à relação com variação da qualidade da água bruta, indica certa deficiência das estações.

A utilização de ferramentas de estatística analítica foi importante para possibilitar conclusões qualitativas e quantitativas não verificadas de imediato. Nesse caso foi realizada ACP em dois momentos: primeiro para explorar informações dos dados fundamentais quanto à consistência e

sobre a predição do desempenho das estações (ver ANEXO III) e, segundo, para identificar a importância de cada indicador no sistema proposto o que está discutido oportunamente ao final desta seção.

Na análise dos dados fundamentais espera-se da ACP que os pontos caracterizados com valores de ordem de grandeza semelhante fiquem agrupados e a percepção da posição relativa dos agrupamentos aos pontos que caracterizam as variáveis, e vice-versa, confirma estatisticamente o comportamento dos dados.

Foram percebidos agrupamentos nas imagens de 81 das 84 ACP geradas (ver ANEXO III), ou seja, em 96%. Por influência mais acentuada da variável vazão de operação (VO) foi identificado agrupamento em 88% das imagens. Por influência da variável turbidez da água bruta (TAB) e turbidez da água tratada (TAD), não necessariamente nas mesmas imagens, foram identificados agrupamentos em 36% do total de imagens. Quanto à turbidez da água tratada (TAT) 57% das imagens mostram agrupamento de forma clara. Por fim, relativos à cor da água tratada (CAT) em 30% das imagens foram identificados agrupamentos. Foram notados agrupamentos relativos a uma ou mais variáveis simultaneamente na mesma imagem.

A recorrência de proximidade de agrupamentos com a vazão de operação teve destaque importante. Assim, ao fazer uma análise particular desta informação foi aprofundada investigação dos pontos que caracterizam os resultados dos dados mais próximos e mais distantes do ponto que caracteriza a vazão de operação.

Destaca-se que os pontos que denotam dias em que a ETA esteve em situação de operação significativamente crítica, e obteve desempenho ruim para os parâmetros turbidez de água decantada (TAD) e tratada (TAT), ficaram destacadamente distantes de VO. O contrário ocorreu para dias de condições operacionais mais favoráveis. Isso pode significar que a vazão de operação chega a ser determinante para um resultado insatisfatório nas ocasiões de dificuldades operacionais.

Ainda com foco na vazão de operação, considerando aspectos de sazonalidade, os meses chuvosos, propícios às situações de elevada turbidez da água bruta (TAB), apresentaram de um modo geral agrupamentos mais nítidos em torno de VO. Isso pode ser decorrente do afastamento dos pontos que denotam dias de dificuldade operacional, que ficam alocados longe de VO, e comprimem o espaço gráfico provocando a impressão de maior nitidez dos agrupamentos. Isso ocorre

destacadamente para a ETA I, ETAAII, ETA IV e ETA V. A retomada da estabilidade das condições operacionais tende a provocar agrupamentos em torno de VO.

A ETA III tem resultado peculiar. Imagens que demonstram dispersão e formação de mais de um agrupamento de forma mais nítida em relação ao verificado para as demais estações de tratamento amostradas. Considera-se que, como esses agrupamentos aconteceram seja em períodos secos ou períodos chuvosos, tal característica pode ser atribuída à qualidade da operação variando de operador para operador ou de mudanças de condições que provocaram limitações operacionais das quais os indícios serão avaliados a partir dos indicadores. Por outro lado, as ACP mostradas para os períodos secos, verificados os resultados de todas as estações, de forma geral, demonstrou difusão de agrupamentos.

A análise de dispersão dos pontos caracterizados pelos dados fundamentais demonstrou dispersão não uniforme e acentuada de parcela importante desses pontos em 22 imagens, o que tende a indicar a irregularidade de frequência de desempenho da estação em determinado mês. No caso específico do presente estudo dados acentuadamente dispersos podem indicar situações anômalas ou desajuste operacional generalizado.

A estação menos regular é a ETA IV que apresenta dispersão acentuada em 33% das 18 imagens geradas a partir de seus dados e a mais regular é a ETA III que apresenta dispersão acentuada em 15% das imagens a partir de seus dados. É importante observar que expressar a regularidade do desempenho nesta seção não é concluir sobre um desempenho satisfatório ou não. Trata-se de uma verificação de expectativas sendo que a confirmação ou não do desempenho satisfatório ocorreu com a aplicação do sistema de indicadores. Porém as informações iniciais podem induzir à conclusão de que a ETA IV tenha pior desempenho que a ETA III.

A variabilidade ou dispersão da qualidade da água nas condições bruta, decantada e tratada também pode ser avaliada através das ACP geradas. Identificou-se menor variação da qualidade da água para a ETA IV sendo identificada essa situação pela proximidade dos pontos que denotam essas variáveis em 64% das imagens geradas a partir de seus dados. A ETA II tende a ser caracterizada como a de maior variação da qualidade da água no decorrer do processo de potabilização, o que é exigido e esperado para essa estação, pois é sabido de antemão que é munida por água normalmente com turbidez elevada. Isso faz supor à primeira vista que o desempenho da ETA II seja pior que da ETA IV.



Outra análise interessante obtida através das ACP consistiu na identificação da diferença nítida de comportamento dos dados dos anos de 2011 e 2012, ou seja, dados de 2011 e 2012 agrupados separadamente, fato que se deve a diferença de desempenho que existiu entre esses períodos. Essa percepção foi possível em pelo menos 25% das 84 ACP geradas. As variáveis que foram determinantes na maioria das imagens para essa verificação foram cor ou turbidez da água tratada, que inclusive definiram agrupamentos em alguns casos entre a vazão de operação e elas mesmas.

Cabe observar que é esperado que o desempenho operacional das estações de tratamento de água seja mantido ou melhorado ao longo dos anos, ou seja, se as variações de qualidade da água bruta são variações já experimentadas pela estação, o resultado esperado do tratamento é o total enquadramento dos parâmetros de potabilidade. Sabe-se que as estações de tratamento de água amostradas tendem ao desempenho operacional ruim devido às condições atuais da estrutura física, por outro lado, tendem ao ajustamento para rotinas operacionais melhores. O efeito dessas tendências atualmente é desequilibrado e a velocidade da perda de eficiência tem sido agravante por isso a diferença de desempenho foi confirmada.

É próprio da ACP que a primeira componente principal explique a parcela maior do comportamento dos dados, o quê pode ser confirmado em todas as imagens. Em algumas situações a primeira componente principal explicou quase completamente o comportamento dos dados. Essa tendência foi considerada quando a explicação pela PC1 alcançou percentual maior que 70%.

O maior número de imagens nas quais foi identificado esse nível de explicação somente com a PC1 ocorreu para a ETA IV, exatamente a ETA com a melhor qualidade de água do manancial; tal situação ocorreu em 19% das imagens geradas. O menor nível de explicação sendo somadas as parcelas percentuais de cada uma das componentes principais foi de 57,17% e o maior de 99,43%, o que implica dizer em alta confiabilidade para concluir sobre os dados.

#### **5.4 Aplicação dos indicadores**

Conferido todo o trabalho preliminar com os dados que fundamentaram a pesquisa, prosseguiu a discussão sobre os indicadores que são o mérito principal deste estudo. A premissa mais importante do tratamento de água é o atendimento aos padrões de potabilidade, assim sendo, definidos os indicadores obtíveis, aqueles coincidentes com a Portaria 2914/2011 foram destacados como de maior relevância neste trabalho conforme método descrito anteriormente.

Se por um lado, tem-se que alguns dos *IR - Indicadores de Resultado* são pré-requisito da Portaria 2914/2011, por outro, alguns dos *IC - Indicadores de Causa* expressam correlação direta com as condições operacionais da estação e previsão da qualidade da água tratada. Dado isso, atribuindo-se peso 1 ou 2 aos indicadores dentro das respectivas categorias, sendo peso 2 atribuído a partir da relevância dos indicadores por coincidência ou afinidade direta com a Portaria 2914/2011, a Tabela 3 caracteriza o sistema de indicadores.

Tabela 3: Atribuição de pesos aos indicadores

<i>CATERGORIA</i>	<i>PESO</i>
INDICADOR DE RESULTADO	
IR01, IR02, IR03	2
IR04, IR05, IR06, IR07	1
INDICADOR DE CAUSA	
IC03, IC04, IC06	2
IC01, IC02, IC05	1

Fonte: O autor

A atribuição de pesos reflete na pontuação obtida pela estação de tratamento de água a partir da aplicação do sistema de indicadores. A motivação para uma abordagem simples e prática foi influenciada pela visão de prestador de serviços e procurou sintetizar a caracterização do problema, o resultado e a tradução clara do que é importante mobilizar para tornar o estado geral das estações favorável. Tem-se até aqui a definição e sistematização dos indicadores.

O critério para atribuição dos pesos foi definido pela coincidência dos indicadores com a Portaria 2914/2011 a fim de destacá-los no caso dos IR; aos coincidentes foi atribuído peso 2. Para os IC o maior peso foi dado a partir da correlação direta com os parâmetros de água tratada que consiste na parcela mais importante quanto à medida de desempenho.

Está contida no decorrer deste trabalho informação de que vários sistemas no Brasil, inclusive esses que serviram a este trabalho com seus bancos de dados, operam no limite da capacidade nominal ou acima dela. A capacidade estimada de produção no país é 587 m<sup>3</sup>/s e as demandas atuais são da ordem de 543 m<sup>3</sup>/s (AGÊNCIA NACIONAL DE AGUAS, 2010); tem-se, portanto, diferença percentual relativa de 8%.

É incerto expressar que não existam no país estações de tratamento bem ajustadas às projeções de final de plano que ainda não expiraram – possivelmente em sistemas de grande porte. Sob essa

hipótese, a diferença percentual relativa de 8% pode ser considerada pequena, o que sugere conclusão de que os sistemas operando na capacidade limite ou acima delas são na sua maioria de pequeno para médio porte.

Corroborar com essa expectativa o fato de que a capacidade de investimentos das pequenas autarquias e dos municípios que gerenciam seus próprios sistemas é menor em relação à capacidade das prestadoras de serviço dos grandes sistemas. Este aspecto significou a partida para o estudo em questão.

A aplicação do sistema de indicadores levou à hierarquização das estações de tratamento de água e a análise individual de cada indicador visa promover orientações para diagnosticar as deficiências e delinear as intervenções a serem realizadas no sistema.

Os números que consistem nos indicadores foram resultado de matemática simples a partir de cálculos de percentuais e razão entre medianas. As expressões de referência estão definidas no Quadro 1. Novamente vale ressaltar a importância dada para a visão simples e prática com intenção de que o sistema de indicadores seja de fácil aplicação.

Quadro 1: Equações para o cálculo dos indicadores propostos

FÓRMULA DE CÁLCULO		
IR01	↑↑	$\frac{\text{Número de amostras com cor} < 15uC}{\text{Total de amostras}} \times 100$
IR02	↑↑	$\frac{\text{Número de amostras com coliformes totais}}{\text{Total de amostras}} \times 100$
IR03	↑↑	$\frac{\text{Número de amostras com turbidez} < 0.5uT}{\text{Total de amostras}} \times 100$
IR04	↑↑	$\frac{\text{N}^\circ \text{ de amostras com turbidez} < 0.5uT \text{ qdo } t_f \text{ (taxa de filtração)} > \text{Norma}}{\text{N}^\circ \text{ Total de amostras qdo } t_f > \text{Norma}} \times 100$
IR05	↑↑	$\frac{\text{N}^\circ \text{ de amostras com turbidez tratada} < 0.5uT \text{ p/ turbidez bruta } 4^\circ \text{ quartil}}{\text{N}^\circ \text{ total de amostras } t_f > \text{Norma}} \times 100$
IR06	↑↑	$\frac{\text{N}^\circ \text{ de amostras com turbidez decantada} < 2uT}{\text{N}^\circ \text{ total de amostras}} \times 100$
IR07	↑↑	$\frac{\text{N}^\circ \text{ de amostras para } Q_O > Q_N \text{ com turbidez} < 0.5uT}{\text{N}^\circ \text{ total de amostras para } Q_O > Q_N} \times 100$
IC01	↑↓	$\frac{\text{Horas anotadas com taxa de filtração} > \text{que a norma}}{\text{Total de horas anuais de operação}} \times 100$
IC02	↑↓	$\frac{\text{Mediana das taxas de filtração} > \text{que a norma}}{\text{Taxa de filtração de referência}}$
IC03	↑↓	$\frac{\text{Mediana de turbidez tratada do universo amostral}}{0.5 uT \text{ (Portaria 2914/20011)}}$
IC04	↑↓	$\frac{\text{Mediana de turbidez decantada do universo amostral}}{\text{Mediana de turbidez tratda do universo amostral}}$
IC05	↑↓	$\frac{\text{Horas anotadas com vazão } (Q_O) > \text{que a vazão nominal } (Q_N)}{\text{Total de horas anuais de operação}} \times 100$
IC06	↑↓	$100\% - \left( \frac{\text{Volume dispendido de água de lavagem}}{\text{Produção anual}} * 100\% \right) / 5\%$

Nota: ↑ ↑ quanto maior melhor  
 ↑ ↓ quanto maior pior

$t_f$  = taxa de filtração.

$Q_O$  = vazão de operação

$Q_N$  = vazão nominal – prescrita pelo projetista

Fonte: O autor

Alguns dos indicadores propostos já foram explorados como parâmetros de referência para trabalhos fundamentados em outros pontos de vista que não o do prestador de serviço. Melo (2014) usou a cor e turbidez da água tratada como parâmetros de avaliação de desempenho. Mariângela de Oliverira(2014) usou a turbidez da água decantada e da água filtrada(tratada) como variável de eficiência de estações de tratamento de água. E ainda, Misael de Oliveira (2014) explorou os parâmetros de atendimento da Portaria 2914/2011 que coincidem com os indicadores IR01, IR02, IR03 também como indicadores para avaliação de desempenho.

Os indicadores IR04, IR05, IR07, IC01, IC02, IC03, IC04, IC05 e IC06 tem interfaces com esses indicadores já explorados, porém foi observado na revisão da literatura que são inovadores e também a abordagem a partir da visão do próprio prestador de serviço com aplicação dos indicadores ora propostos também é inovadora.

Aplicada a metodologia proposta no item 4, apresenta-se na Tabela 4 o resultado do cálculo dos indicadores propostos para as cinco estações de tratamento de água amostradas.

Tabela 4: Resultado de cálculo dos indicadores

<i>MÉDIA 2011/2012</i>										
INDICADOR	ETA I	Número de registros	ETA II	Número de registros	ETA III	Número de registros	ETA IV	Número de registros	ETA V	Número de registros
IR01	78%	3635	75%	4599	73%	6267	99%	1904	68%	5151
IR02	100%	86	100%	136	100%	215	100%	204	100%	122
IR03	22%	8160	29%	7789	17%	8564	59%	8242	6%	7830
IR04	22%	*	29%	*	16%	8564	62%	6452	7%	3126
IR05	8%	1971	16%	1922	0%	2131	20%	2441	3%	1895
IR06	72%	8176	44%	8274	79%	8597	90%	8245	23%	7833
IR07	22%	232	31%	5895	18%	8477	66%	6661	6%	1
IC01	0%*	16708	0%*	16698	100%	17198	82%	16928	42%	15880
IC02	0.66	8354	0.67	8341	1.74	8593	1.20	8450	0.98	7943
IC03	1.45	8151	1.52	7822	1.87	8493	0.87	8228	3.20	7821
IC04	1.44	8186	2.88	8295	1.04	8582	1.32	8286	2.70	7862
IC05	3%	8319	95%	8272	100%	8592	82%	8442	0%**	7932
IC06	53%	355	58%	231	59%	362	68%	377	0%***	866

\*Obtidos valores nulos do indicador IC01, ao IR04 foi atribuído o valor do indicador IR03 convencionado nesta situação como expectativa de sucesso na ocorrência taxa de filtração maior que a norma.

\*\*Obtidos valores nulos do indicador IC05, ao IR07 foi atribuído o valor do indicador IR03 convencionado nesta situação como expectativa de sucesso na ocorrência de vazão afluente maior que a nominal.

\*\*\* Obtidos percentuais de água de lavagem maiores que 5%, há regularidade de lavagem dos filtros, portanto, ao indicador IC06 é atribuído o valor 0%.

Fonte: O autor

As sobreposições e correlações dos indicadores foram analisadas através do cálculo dos coeficientes de Kendall Tau e Spearman, para  $p\text{-valor}<0,05$  em termos de significância. Ambos destacaram as mesmas correlações para o nível de confiança de 95%,  $p\text{-valor}<0,05$ . Assim sendo é apresentado na Tabela 5 a seguir o resultado de cálculo dos coeficientes de Spearman e evidenciadas algumas correlações destacadas a partir do teste não paramétrico para  $p\text{-valor}<0,05$ . Trata-se de análise bivariada que possibilita discutir a relevância da permanência de um ou outro indicador no sistema proposto. A seguir a tabela:

Tabela 5: Coeficiente de correlação de Spearman Rank para os indicadores

	IR01	IR02	IR03	IR04	IR05	IR06	IR07	IC01	IC02	IC03	IC04	IC05	IC06
IR01	1.00		<b>0.90</b>	<b>0.90</b>	0.80	0.70	<b>0.90</b>	-0.10	-0.20	<b>-1.00</b>	-0.20	0.10	0.60
IR02		1.00											
IR03			1.00	<b>1.00</b>	<b>0.90</b>	0.60	<b>1.00</b>	-0.20	-0.10	<b>-0.90</b>	0.00	0.30	0.70
IR04				1.00	<b>0.90</b>	0.60	<b>1.00</b>	-0.20	-0.10	<b>-0.90</b>	0.00	0.30	0.70
IR05					1.00	0.30	<b>0.90</b>	-0.40	-0.30	-0.80	0.30	-0.10	0.40
IR06						1.00	0.60	0.60	0.50	-0.70	-0.80	0.50	<b>0.90</b>
IR07							1.00	-0.20	-0.10	<b>-0.90</b>	0.00	0.30	0.70
IC01								1.00	<b>0.90</b>	0.10	<b>-0.90</b>	0.30	0.50
IC02									1.00	0.20	-0.70	0.50	0.60
IC03										1.00	0.20	-0.10	-0.60
IC04											1.00	-0.40	-0.60
IC05												1.00	0.70
IC06													1.00

Fonte: O autor

Estão destacadas nas tabelas as correlações entre indicadores as quais há probabilidade maior que 95% de que sejam verdadeiras descartando nesse nível de confiança a hipótese alternativa. Por outro lado, para as outras correlações calculadas estatisticamente não se descarta a hipótese alternativa com argumento de que a correlação pode ser coincidência. Das 78 combinações analisadas 16 indicaram correlação destacada, ou seja, 21% das análises. As probabilidades verificadas a partir do coeficiente de Spearman foram maiores que as calculadas para o coeficiente de Kendall Tau.

A correlação do indicador IR01 com os indicadores IR03, IR07 leva a concluir uma interface interessante sendo que, com nível de confiança de 95%, tende a ficar esclarecida estatisticamente correlação conceitual em que o parâmetro turbidez tem afinidade com o parâmetro cor aparente.

Porém, o indicador IR03 – turbidez da água tratada terá influência no resultado do indicador IR01 – cor da água tratada, se a magnitude da turbidez for determinante para interferir de modo que o parâmetro de cor extrapole 15 uC.

Pelo aspecto conceitual esperava-se que o teste não paramétrico destacasse a probabilidade de IR03 e IC06 estarem correlacionados, afinal a irregularidade na frequência de lavagem dos filtros representada pelo indicador IC06 tende a influenciar os resultados de turbidez da água tratada, porém essa probabilidade não foi destacada para 95% de confiança. Cabe observar que o Coeficiente de Spearman de **0.70** para a correlação entre IR03 e IC06 tende a comprovar estatisticamente a afinidade entre esses indicadores, mas não é possível descartar a hipótese alternativa definida como possível coincidência.

A correlação estatística do indicador IC06 com o indicador IR06 tem consistência conceitual e prevalece para um nível de confiança de 95%. A medição do indicador IR06, que trata da turbidez da água decantada, não está atrelada ao indicador IC06 em nenhum momento do fluxograma da estação, entretanto, a afinidade conceitual reside no fato da turbidez da água decantada interferir na frequência de lavagem dos filtros. Cabe esclarecer que não é uma correlação de sobreposição, trata-se de evidência de influência de IR06 em IC06.

Com relação à análise bivariada é possível expressar que a correlação estatística do sistema de indicadores por inteiro não está resumida na análise dos pares e deve ser considerado o sistema de indicadores por inteiro, pois, ao que parece estabeleceu-se correlações na sua maioria numéricas.

Não pode ser desconsiderado que haja afinidade numérica e conceitual concomitantemente entre os pares, entretanto, existem detalhes conceituais que impedem confirmar a prevalência estatística quanto à análise bivariada para todo e qualquer conjunto de estações de tratamento de água, ou seja, as correlações presentes na Tabela 5 tendem ser peculiares ao universo amostral estudado. A análise bivariada indicou possíveis sobreposições, mas conceitualmente é interessante que prevaleçam todos os indicadores no sistema. Assim concluído, passa-se à hierarquização das estações.

A proposta de hierarquização partiu de uma avaliação expedita. O fundamento para hierarquização foi o conhecimento adquirido a partir da literatura e no acompanhamento do funcionamento das estações estudadas. A hierarquização segundo os indicadores está apresentada na Tabela 6 e na Tabela 7 segundo os pesos atribuídos por relevância dos indicadores. Propôs-se uma hierarquização

segundo o Índice de Desempenho Operacional (IDO), fundamentado pelos IR, e outra segundo Índice de Sobrecarga Operacional (ISO), com referência aos IC. Sendo que:

$$IDO = \sum_{n=7}^{i=1} IR_i \quad (1)$$

i = i-ésimo Indicador de Resultado (IR) com peso atribuído

E,

$$ISO = \sum_{n=6}^{i=1} IC_i \quad (2)$$

i = i-ésimo Indicador de Causa (IC) com peso atribuído

Então,

Tabela 6: Hierarquização segundo os Indicadores de Resultado considerando os pesos

<i>Estação</i>	<i>IDO</i>
ETA IV	7.56
ETA II	5.28
ETA I	5.22
ETA III	4.94
ETA V	3.86

Fonte: O autor

A hierarquização segundo IR demonstrou a fragilidade das estações estudadas. Não foi avaliada uma expectativa inicial para o resultado completo da hierarquização, mas era sabido de antemão que a ETA I, ETAI e ETAIV são menos suscetíveis a picos de turbidez da água bruta. Verificou-se que a ETA III, teoricamente com maior suscetibilidade ao sucesso no desempenho devido a uma menor variação da qualidade da água afluyente, tem desempenho pior que a ETA II, mais suscetível à variação desse parâmetro, aliás, com elevados picos de turbidez afluyente o que pode ser observado no banco de dados.

Pela ótima qualidade da água bruta do manancial já era esperado que a ETA IV pudesse ter o melhor IDO. Então foi obtida uma hierarquização plausível. A escala de pontuação para o IDO é de 0 a 10.



Tabela 7: Hierarquização segundo os Indicadores de Causa considerando os pesos

<i>Estação</i>	<i>ISO</i>
ETA V	13.19
ETA II	11.57
ETA III	10.75
ETA IV	8.56
ETA I	7.54

Fonte: O autor

A hierarquização segundo IC não espelhada em relação à hierarquização segundo IR demonstra que não necessariamente o ISO define o desempenho da estação quanto ao IDO, embora a ETA V com o maior ISO realmente tenha o pior resultado de IDO, mas há uma alternância de posto na classificação inversa das demais estações em termos de expectativa de desempenho considerando IR e IC.

A escala de pontuação para o ISO é indefinida dado que o valor do ISO é originado das condições operacionais estabelecidas nas estações amostradas ao longo do período de funcionamento avaliado, ou seja, os valores dos Indicadores de Causa não têm teto pré-estabelecido porque são resultados de influência aleatória das condições de campo. Portanto, para efeito de análise, conclui-se que quanto maior o ISO maior a tendência de influência da sobrecarga operacional no desempenho da estação de tratamento de água, embora essa tendência possa não ser confirmada a partir do cálculo do IDO.

Foi julgado interessante fazer alguns testes para demonstrar efetividade dos indicadores em termos de hierarquização. Primeiro foi feita a hierarquização considerando somente o IR03 – turbidez da água tratada (

Tabela 8).

Tabela 8: Hierarquização segundo IR03 – percentual de amostras com turbidez da água tratada inferior a 0,5uT

<i>Estação</i>	<i>IR03</i>
ETA IV	1.19
ETA II	0.58
ETA I	0.43
ETA III	0.34
ETA V	0.11

Fonte: O autor

Não houve alternância nas posições de ranking em relação à Tabela 6, ou seja, considerando a teoria dos indicadores IR e IC, no estudo em questão, o resultado de atendimento do padrão turbidez da água tratada pode responder sozinho a hierarquização. Entretanto, como matematicamente e conceitualmente não foi encontrado nenhum impedimento de ocorrer situação de não coincidência, sugere-se considerar todos os IR na verificação da hierarquização.

Fica ainda reafirmada a importância individual dos IR os quais, de acordo com suas especificidades, respondem detalhes importantes da rotina operacional da estação de tratamento de água.

Foi verificado que os pesos atribuídos aos indicadores IR, quanto ao universo amostral estudado, não implicaram em alteração na hierarquização quando desconsiderados (Tabela 9). Entretanto, é possível matematicamente e conceitualmente que exista situação em que isso não ocorra, ou seja, é possível que indicadores de peso 1 sejam preponderantes na hierarquização. Entretanto, com vista ao destaque que merece a premissa de atendimento aos padrões de potabilidade a partir da medição de parâmetros já consagrados, aqui vistos como indicadores IR01, IR02 e IR03, mantém-se a aplicação de pesos.

Tabela 9: Hierarquização das estações a partir dos Indicadores de Resultados sem atribuição de pesos

<i>Estação</i>	Desempenho médio 2011/2012 IR - sem os pesos
ETA IV	4.97
ETA II	3.24
ETA I	3.22
ETA III	3.04
ETA V	2.12

Fonte: O autor

Para os IC a não atribuição de pesos provocou mudança de posto na hierarquização da ETA II e ETA III (Tabela 10) em relação à quando é atribuído pesos (Tabela 7), isso destaca os indicadores os quais foi atribuída maior significância, demonstrando que os indicadores IC são menos dependentes e menos tendentes a eventuais sobreposições.

Tabela 10: Hierarquização segundo os Indicadores de Causa sem atribuição de pesos

Estação	Desempenho médio 2011/2012 IC – sem os pesos
ETA V	7.30
ETA III	7.24
ETA II	6.60
ETA IV	5.70
ETA I	4.12

Fonte: O autor

Foram feitas mais algumas hierarquizações que reafirmaram a menor probabilidade de sobreposição dos IC, uns em relação aos outros (Tabela 11 e Tabela 12). Pelas razões ora explicadas, decidiu-se por validar todos os indicadores.

Tabela 11: Hierarquização segundo IC02 - Razão entre a mediana das taxas de filtração reais e a taxa de filtração de norma - NBR 12216

Estação	Desempenho médio 2011/2012 IC – 02
ETA III	1.74
ETA IV	1.20
ETA V	0.98
ETA II	0.67
ETA I	0.66

Fonte: O autor

Tabela 12: Hierarquização segundo IC04 - Razão entre a mediana da turbidez decantada e mediana da turbidez tratada

Estação	Desempenho médio 2011/2012 IC-04
ETA II	5.75
ETA V	5.40
ETA I	2.87
ETA IV	2.63
ETA III	2.09

Fonte: O autor

Hierarquizar as estações amostradas é premissa importante para a administração das estações de tratamento. Além disso, gestão envolve planejar com identificação de necessidades e definição de prioridades, sendo que, quando é considerada uma hierarquização, tem-se uma parcela de informação importante para esse planejamento. A partir disso, é possível detalhamento que corrobore com diretrizes adequadas para as melhorias.

Todas as estações de tratamento puderam ser visitadas antes da concepção dos indicadores e outras visitas foram feitas no decorrer do desenvolvimento, sendo que a inferência da necessidade de melhorias nas estações foi generalizada. Por outro lado, a dificuldade de decisão de onde intervir prioritariamente foi notória. Cabe lembrar que os sistemas devem rotineiramente vistoriados pelos técnicos responsáveis e as informações sobre o que for averiguado nas vistorias deve ser registrada em relatórios, entretanto, visualmente as informações podem não estar claras e organizadas, por isso torna-se importante a aplicação de indicadores.

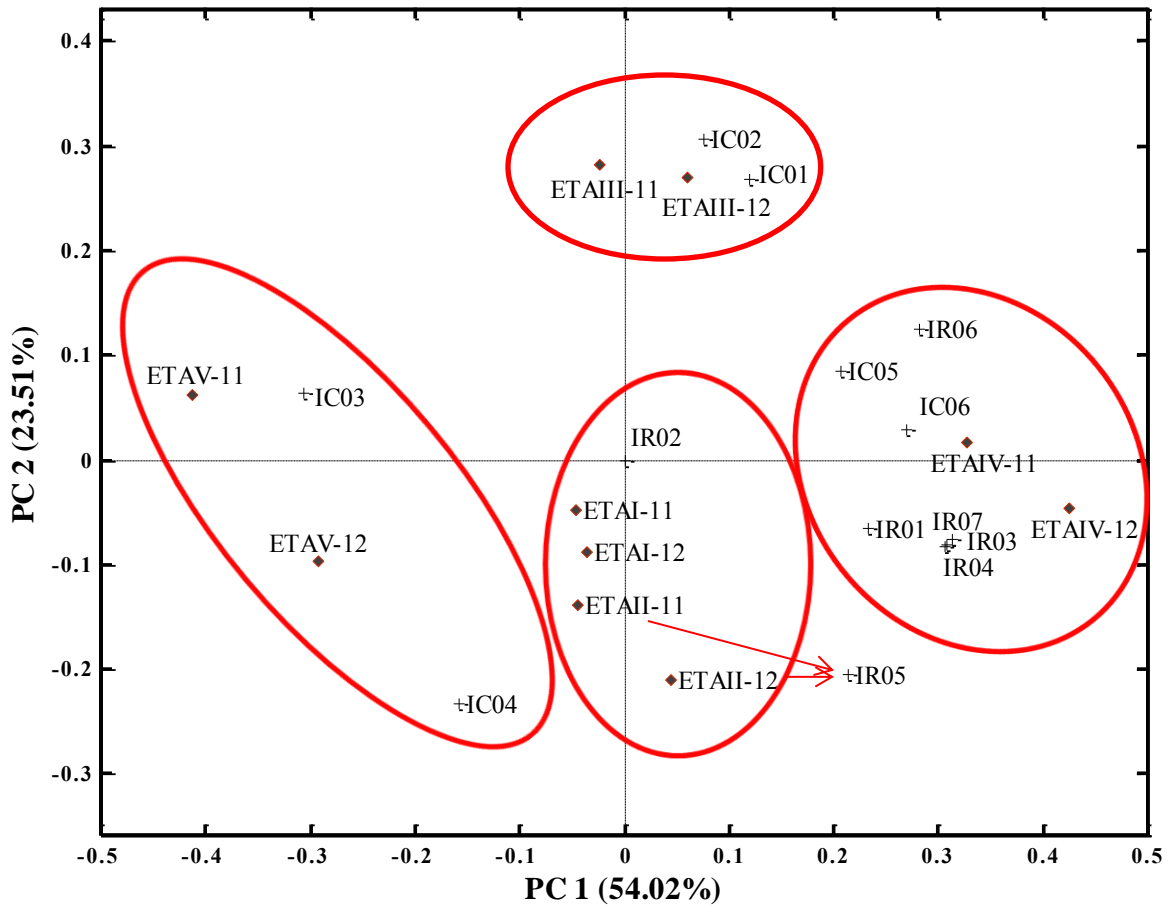
Em algumas das estações foram identificados imediatamente vários problemas de funcionamento e o mesmo problema foi identificado em duas ou mais estações. Os indicadores viabilizaram quantificar e caracterizar a gravidade de condições encontrada em cada estação. A priorização, confusa inicialmente, embora com a urgência de intervenções, visa à proposição de decisões plausíveis e organizadas. Em novas visitas feitas após obtenção dos resultados viu-se que a hierarquização demonstrou a classificação dos sistemas de forma coerente.

### **5.5 Aplicação da ACP ao sistema de indicadores proposto**

A ACP forneceu o fundamento estatístico no qual foram analisadas as relevâncias de cada indicador para a medida de desempenho das estações. A ACP foi aplicada para explicar se a avaliação expedita encontra sustentação e se levou à hierarquização coerente para as estações estudadas (Figura 7). Vale ressaltar que a proposta desse trabalho corrobora com a definição de prioridades para eventuais intervenções, com a demonstração de indícios dos desajustes entre as múltiplas etapas do tratamento e contribuição para melhorar os resultados das estações quanto à produção de água em quantidade e qualidade satisfatórias.

O aspecto didático dos indicadores está abordado na discussão dos mesmos de forma individual conforme expresso na definição e proposição. Sugere-se que o trabalho de diagnóstico parta da aplicação da teoria dos indicadores ora propostos.

Figura 7: Análise de componentes principais - indicadores



Fonte: O autor

A partir da aplicação da ACP ao sistema de indicadores proposto, pontua-se que:

- I. A ETA IV foi identificada como a estação de melhor desempenho na avaliação expedita. De acordo com gráfico de estabelecimento das componentes principais que explicam o quadro estudado, os indicadores de maior relevância na classificação da ETAIV foram *IR01*, *IR03*, *IR04*, *IR07* e *IR06*; cinco indicadores de resultado definidos por parâmetros de potabilidade, sendo um referente à cor aparente da água tratada e os demais referentes à turbidez da água tratada. Por outro lado, os indicadores que mais tenderam a prejudicar a estação no sentido de obter maior IDO foram *IC05* e *IC06*;
- II. A tendência de aproximação dos *IR* em relação à ETA IV, com melhor desempenho operacional, comprova que a técnica de aplicação da ACP por verificação dos agrupamentos é adequada à análise do conjunto de estações estudado. A ACP demonstrou

que quanto maior o IDO mais destacado é o agrupamento de indicadores na região em que está localizada graficamente a estação.

- III. Não é desproporcional concluir que quanto maior o *ISO* maior será a tendência de afastamento dos *IR* da região gráfica em que a estação estiver alocada. Na ocorrência desse afastamento é possível concluir que as condições operacionais interferiram efetivamente no desempenho da estação de tratamento de água. A posição do ponto que denota a ETA V com indicadores *IR* muito afastados dele explica isso;
- IV. A ETA V apresenta ineficiência importante na clarificação, inclusive mais acentuada em 2012 explicada pela proximidade do indicador IC04. Demonstra, inclusive, que a turbidez decantada relativamente alta não é depurada pelos filtros. A proximidade do ponto que denota a ETA V com o indicador IC03 explica esse fato. Além disso, a ETA V foi classificada como a de pior IDO e maior ISO na hierarquização. Encontra-se explicação para a probabilidade de um desempenho ruim devido às condições operacionais a que está submetida e que nada foi projetado até o presente para contornar a situação. A partir desse esclarecimento, verificar o processo de clarificação deve ser o caminho para a melhoria do desempenho;
- V. O desempenho da ETA III é afetado de forma evidente pelos indicadores IC01 e IC02. São indicadores que caracterizam sobrecarga, principalmente dos filtros. Na hierarquização, a ETA III não se encontra com IDO nulo, portanto a condição de sobrecarga não é a causa única de desempenho insatisfatório. Para correção da deficiência devem ser pensados meios de diminuir os valores principalmente do indicador IC02. A troca do meio filtrante e consequente aumento da capacidade de taxa de filtração pode corresponder à solução;
- VI. As ETA I e ETA II merecem destaque com relação à proximidade com o indicador IR02. A ETA I é menos implicada por condições de sobrecarga, isso a aproxima da probabilidade de manter 100% de atendimento ao padrão de potabilidade de coliformes totais. Por outro lado, a ETA II é a segunda classificada tanto com relação ao IDO quanto com relação ao ISO, estando suscetível a condições pouco favoráveis, analisando a proximidade como indicador IR02, a ACP permite concluir que a ETA II é a estação com maior esmero operacional e, considerando o IDO e o ISO, é a estação que tem o melhor desempenho relativo.

- VII. A evidência estatística acerca do desempenho relativo da ETA II, definido por um valor importante de ISO e ao mesmo tempo um valor de IDO melhor que o calculado para a ETA III que tem maior facilidade operacional, é marcada ainda pela proximidade do IR05 que descreve o sucesso da estação na ocorrência de turbidez elevada. Há tendência maior de sucesso para atendimento do padrão turbidez da água tratada no caso da ETA II nessa situação específica.
- VIII. O distanciamento entre pontos que denotam determinada estação em relação aos anos de 2011 e 2012 demonstra a diferença de desempenho nos respectivos anos. Vê-se que a ETA V teve maior diferença de desempenho e vale considerar que de um modo geral o desempenho das estações melhorou de 2011 para 2012.

Buscou-se obter da ACP (Figura 7) uma hierarquização dos indicadores. O nível de explicação somado da primeira componente principal, 23,51%, com a segunda componente principal somado, 54.02%, é 77.53% o que significa nível satisfatório para concluir. Partindo do fato de que a ETA IV foi identificada como a de melhor desempenho, é possível identificar os indicadores que foram determinantes para o desempenho dessa estação. Os pontos que denotam esses indicadores graficamente ficaram alocados próximos à ETAIV. Assim, para o conjunto de estações estudado, os indicadores em ordem de relevância para determinar o desempenho das estações, analisando a proximidade geográfica na imagem, são: IR03, IR07, IR04, IR01, IC05, IC06, IR06, IR05, IR02, IC01, IC02, IC04 e por último IC03.

A atribuição de pesos proporcionou efeito na geração das componentes principais e a proximidade dos pontos que remetem aos indicadores com o ponto que denota a ETA IV indica importância no sentido de uma classificação de destaque para esses indicadores. Entretanto nem todos os indicadores aos quais foi atribuído peso 2 confirmaram sua relevância na ACP.

Na ordem de relevância avaliada, a imagem não pôs em destaque o parâmetro coliforme total, inferido pelo indicador IR02, igualmente importante ao indicador IR03, por exemplo. Como são premissas imediatas preconizadas pela portaria 2914/2011 a remoção de turbidez e a eliminação ou inativação de microrganismos, esperava-se que o IR02 fosse destacado tal como o IR03.

Mas, cabe observar que, como a remoção de *E.coli* é relativamente simples e todas as estações cumpriram essa meta, a imagem das componentes principais pode ter sim fornecido uma hierarquização plausível dos indicadores por análise de proximidade. Além disso, os indicadores que trazem no seu conceito o parâmetro turbidez tendem ser realmente mais relevantes a partir de

que a redução de turbidez a níveis que atendam a portaria 2914/2011 potencializam a eliminação de risco microbiológico.



## 6. CONCLUSÕES

Pode não ser adequado buscar avaliações tendo como base o conjunto completo e extenso de variáveis que é intrínseco à potabilização de água para consumo humano. A presente pesquisa resultou numa opção de ferramenta de avaliação de desempenho de estações de tratamento de água que se utiliza somente de parcela de informações. Ferramenta essa projetada com o propósito de ser simples, objetiva, e que viabilize respostas consistentes, feita com autonomia do ponto de vista de quem tem o interesse na resposta. O próprio prestador de serviço é que convive com os gargalos da operacionalização e manutenção das estações de tratamento de água.

A autonomia com a qual foi produzido o sistema de indicadores pode ter gerado ferramenta que ficará sujeita a propostas de agregações e supressões e é fundamental que isso ocorra, pois nessa espécie de estudo, que gera proposição de indicadores, dificilmente será construída uma ferramenta universal. Uma proposta universal não parece viável pelo extenso número de variáveis envolvidas.

Assim, foi viável trabalhar com quantidade delimitada de informação. Explorando as informações dessa maneira, visto que o resultado é efetivo, ou seja, se permite explicações quanto às estações estudadas que esclarecem os obstáculos e proporcionam a organização do planejamento, é possível convicção para coloca-la disponível para aplicação. Ao propor indicadores, considera-se importante estudar parcelas do todo e ver qual resultado isso proporciona ao invés de abarcar todas as informações e tornar a aplicação complexa.

A partir da revisão da literatura e dos resultados obtidos é possível concluir que:

- i. As potencialidades e efetividade da aplicação do sistema de indicadores proposto estão embutidas na concepção e conceito de cada indicador. Conforme já argumentado, trata-se da obtenção de respostas para iniciar o processo de melhoria contínua na gestão das estações de tratamento de água. Os indicadores apontaram que as estações estudadas têm deficiências sendo necessário iniciar com urgência a revisão, sugerindo que a ETA V seja avaliada de forma minuciosa;
- ii. A discussão a partir da aplicação das ferramentas estatísticas de análise bivariada e multivariada combinada com conceitos e experiências adquiridos na literatura, considerando a vivência em operacionalizar e manter estações de tratamento de água, demonstrou que os indicadores podem ser aplicados;

- iii. As limitações do banco quanto à quantidade de dados de cor aparente de água tratada podem ter prejudicado a quantidade de respostas a ser obtida. Além disso, a liberdade metodológica aplicada supõe simplicidade. Entretanto, os esclarecimentos fornecidos pelos indicadores, corroborados com a especificidade técnica de cada qual, foram razoáveis a ponto de serem colocados à disposição para contribuir para o melhor gerenciamento das estações de tratamento de água amostradas, inclusive recomenda-se que isso seja feito partindo da especificidade técnica de cada indicador;
- iv. A correlação entre indicadores existiu em 21% das análises bivariadas. Isso foi considerado percentual baixo de interfaces entre indicadores dentro do sistema. O indicador IR03 ganhou destaque por responder hierarquização idêntica à resultante do sistema de indicadores completo e análise multivariada evidenciou sobreposição nítida entre os indicadores IR03 e IR04, contudo, cada indicador tem informação conceitual específica ligada às múltiplas etapas do tratamento de água, assim sendo, mesmo eventualmente apontadas sobreposições na análise multivariada, descartar indicadores poderia representar perda de informação;
- v. Foi possível a hierarquização das estações de tratamento de água e, a partir do conceito e da especificidade técnica de cada indicador, está aberto o caminho para o trabalho de avaliação precisa com caracterização qualitativa das deficiências estruturais e operacionais das estações amostradas. Os indicadores aqui propostos são a partida para adentrar as fases de priorização, diagnóstico, proposição de procedimento operacional padrão ou projeto, orçamento e execução de obras. A própria teoria e conceito dos indicadores demonstra isso.
- vi. Ficou evidenciado que a ETA V de fato tem o pior desempenho analisando o IDO e o ISO. Considerando somente o atendimento de padrões, ou seja, somente o resultado do IDO, a ETA IV tem o melhor desempenho facilitado, inclusive, pela qualidade de água do manancial.
- vii. Considerando paralelos entre o IDO e o ISO, a ETA II tem desempenho a ser destacado porque tem ISO somente menor que da ETA V, 35% maior que da ETA IV, e mesmo assim obteve IDO maior comparado a três das cinco estações estudadas. O IDO obtido das estações não foi nulo o que demonstra que as estações convencionais têm certos limites de robustez para sobrecargas operacionais as quais podem ser amortecidas pela operacionalização eficiente. A operacionalização da ETA II tende a ser a mais eficiente

considerando as estações amostradas, contudo seu resultado não dispensa investimentos em melhorias estruturais e operacionais. Inclusive, o IDO de todas as estações pode ser melhorado.

Não foram esgotadas todas as possibilidades de concepção de indicadores o que abre precedente para trabalhos futuros, inclusive é importante que isso seja feito a partir de um banco de dados que possibilite abordagens diferentes e/ou de outra amplitude. Outra sugestão para trabalhos futuros é a aplicação da análise de componentes principais com base nos dados brutos, sem conversão em indicadores, para predição do desempenho das estações de tratamento de água.

Cabe registrar também que o banco de dados disponível não se mostrou suficiente para aplicação de outros sistemas de indicadores e comparação com o sistema ora proposto. Até por isso, a proposta foi construída considerando no decorrer do desenvolvimento a aplicação dos indicadores obteníveis. Ou seja, não foi possível obter, por exemplo, o IQETA, mencionado do decorrer da revisão da literatura.

## 7. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AGUAS. **Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de água: panorama nacional - Volume 1**. BRASÍLIA: AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2010.

ALMEIDA, J. M. E. S. **Otimização do índice de qualidade de estação convencional de tratamento de água (IQETA) por meio de análise estatística multivariada**. [S.l.]: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. . 1992, p. 18.

BERNARDO, L. DI; DANTAS, Â. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2ª Edição ed. São Carlos - SP: EDITORA RIMA, 2005.

BRASIL. **Resolução CONAMA 357/2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União**. [S.l: s.n.]. , 2005

BRASIL, L. 11.445, de 5 de Janeiro de 2007. **Brasília**, 2007.

BRASIL, M. D. S. **Portaria nº 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. Diário Oficial da União**. [S.l: s.n.]. Disponível em: <<https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&q=portari+2914&btnG=&lr=#0>>. Acesso em: 14 jan. 2015. , 2011

BROOKS, J. P.; DULÁ, J. H.; BOONE, E. L. A pure L1-norm principal component analysis. **Computational Statistics and Data Analysis**, v. 61, p. 83–98, 2013.

BROWN, R.; MCCLELLAND, N.; DEININGER, R.; TOZER, R. A water quality index- do we dare. **Water & sewage works**, v. 117, n. 10, p. 339–343, 1969.

CHANG, E.; CHIANG, P.-C.; HUANG, S.-M.; LIN, Y.-L. Development and implementation of performance evaluation system for a water treatment plant: case study of Taipei water treatment plant. **PRACTICE PERIODICAL OF HAZARDOUS, TOXIC, AND RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT**, n. January, p. 36–47, 2007.

DALLA VALLE, C.; DALLA VALLE, C.; MENDONÇA, R. A. B. A Gestão de Pessoas como Parceira Principal para o Sucesso Organizacional. **Revista Eletrônica da URI**, v. 8, p. 32–39, 2012.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de saneamento**. [S.l: s.n.], 2006.

GAO, J.; KWAN, P. W.; GUO, Y. Robust multivariate L1 principal component analysis and

- dimensionality reduction. **Neurocomputing**, v. 72, p. 1242–1249, 2009.
- GUPTA, S. K.; SINGH, R. K.; MURTY, H. R.; DIKSHIT, A. K. An overview of sustainability assessment methodologies. **Ecological Indicators**, v. 15, n. 1, p. 281–299, 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa nacional de saneamento básico - 2008**. RIO DE JANEIRO: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010.
- JONES, S. C.; SOWBY, R. B. Water system optimization: Aligning energy efficiency, system performance, and water quality. **Journal - American Water Works Association**, v. 106, n. 6, p. 66–71, 1 jun 2014.
- KAWAMURA, S. **Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities**. [S.l: s.n.], 1991.
- LIBÂNIO, M. **Fundamento de Qualidade e Tratamento de Água**. 3ª EDIÇÃO ed. CAMPINAS-SP: EDITORA ÁTOMO, 2005.
- LOPES, V. C.; LIBÂNIO, M. **Proposição de um índice para avaliação do desempenho de estações convencionais de tratamento de água**. [S.l: s.n.], 2005.
- MAKUNGO, R.; ODIYO, J. O.; TSHIDZUMBA, N. Performance of small water treatment plants: The case study of Mutshedzi water treatment plant. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 36, n. 14-15, p. 1151–1158, 2011.
- MATHWORKS. **MATLAB 7.9.0 R2009B**. . [S.l: s.n.]. , 2009
- MATOS, G. D.; PEREIRA-FIHO, E. R.; POPPI, R. J.; ARRUDA\*, M. A. Z. Análise exploratória em química analítica com emprego de quimiometria : PCA e PCA de imagens. **Revista Analytica**, v. 6, p. 38–50, 2003.
- MELO, L. D. V. **Aplicação de técnicas estatísticas para avaliação de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento de água**. [S.l.]: UFMG - UNIVERSIADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2014.
- MERCER, K. 2014 State of the Water Industry: Ongoing challenges and no easy solutions. **Journal - American Water Works Association**, v. 106, Numbe, n. June, p. 4570–4571, 1985.
- MICROSOFT. **EXCEL 2010**. . [S.l: s.n.]. , 2010
- MIRANDA, A. B.; TEIXEIRA, B. A. D. N. Indicadores para o monitoramento da sustentabilidade em sistemas urbanos de abastecimento de água e esgotamento sanitário. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 279, 2004.
- OLIVEIRA, M. D. DE. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de estações convencionais de tratamento de água**. [S.l.]: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS

GERAIS, 2014.

OLIVEIRA, M. D. DE. **Desenvolvimento, aplicação e avaliação de sistema de indicadores de desempenho de estações de tratamento de água.** [S.l.]: UFMG, 2014.

RAHMAN, S.; ZAYED, T. Condition Assessment of Water Treatment Plant Components. **JOURNAL OF PERFORMANCE OF CONSTRUCTED FACILITIES**, n. August, p. 276–288, 2009.

REIS, G. M.; JÚNIOR, J. I. R. **Comparação de testes paramétricos e não paramétricos aplicados em delineamentos experimentais.** III Saepro. **Anais...** Viçosa: UFV. , 2007

RIBEIRO, H. K. D. S. E. S. **Avaliação de desempenho ambiental em estações de tratamento de água.** [S.l: s.n.], 2003.

RODRIGUES VALADARES VERAS, L.; BERNANRDO, L. DI. Ttratamento de Águas de Abastecimento por meio da Filtração em Múltiplas Etapas - FIME. p. 109–116, 2008.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E.; ROMEIRO, A. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & sociedade**, v. 10, p. 137–148, 2007.

SILVA, C. F. DA. **Remoção de Cistos e Oocistos e Indicadores Físicos de *Cryptosporidium Parvum* em Águas de Abastecimento por Meio da Decantação- Estudo em Escala Piloto.** [S.l.]: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2008.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, J. F.; CROUCH, S. R. **Fundamentos de química analítica.** 8ª EDIÇÃO ed. [S.l: s.n.], 2006. v. 1

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2000.** [S.l: s.n.], 2000. v. 1

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2010.** [S.l: s.n.], 2010. v. 1

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Diagnóstico dos serviços de água e esgoto - 2014. [S.l: s.n.], 2014. v. 53p. 1689–1699.

SOUZA, M. E. T. A. DE; LIBÂNIO, M. Proposta de Índice de Qualidade para Água Bruta afluyente a estações convencionais de tratamento. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 471–478, 2009.

SPERLING, M. VON. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3ª Edição ed. BELO HORIZONTE: DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL; UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS: EDITORA UFMG, 2005.

STATSOFT. **STATISTICA 7.0.** . [S.l: s.n.]. , 2007

TOWLER, E.; RAJAGOPALAN, B.; SUMMERS, R. S. Using Parametric and Nonparametric Methods to Model Total Organic. **Environmental Engineering Science**, v. 26, n. 8, 2009.

TRUSSELL, R. R. Water treatment the past 30 years. **Journal - American Water Works Association**, n. March 2006, 2005.

UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Filter Backwash Recycling Rule. **EPA Guidance Manual - FBRR Technical Guidance Manual**. [S.l: s.n.], 2002. p. 178.

VIEIRA, P.; SILVA, P.; ROSA, C.; *et al.* “A PI system for drinking water treatment plants- framework and case study application.” In: CABRERA, E. A. JR; PARDO, M. A. (Eds.). . **Performance Assessment of Urban Infrastructure Services**. [S.l: s.n.], 2008. p. 389–401.

WOLD, S.; ESBENSEN, K.; GELADI, P. Principal component analysis. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 2, p. 37–52, 1987.

WOLMAN, A. What Became of Sanitary Engineering? **Journal - American Water Works Association**, v. 69, n. 10, p. 515–518, 1 out 1977.

ZHANG, K.; ACHARI, G.; SADIQ, R.; LANGFORD, C. H.; DORE, M. H. I. An integrated performance assessment framework for water treatment plants. **Water Research**, v. 46, n. 6, p. 1673–1683, 2012.

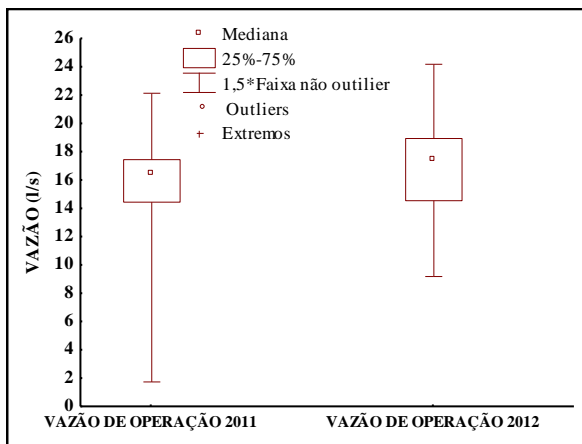
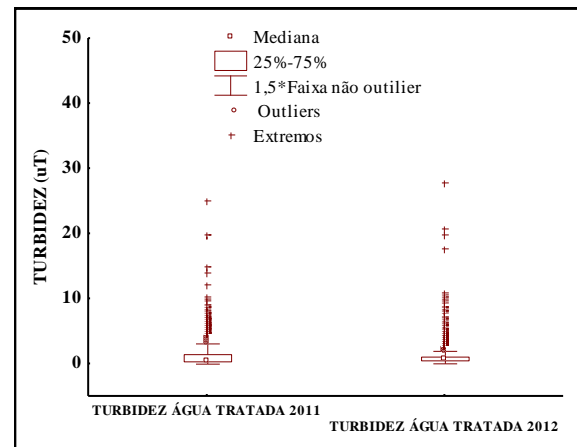
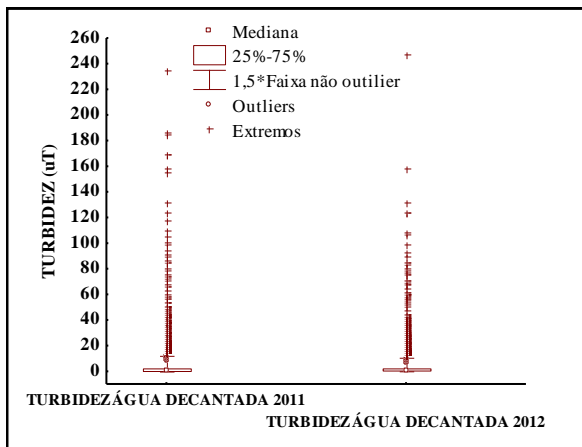
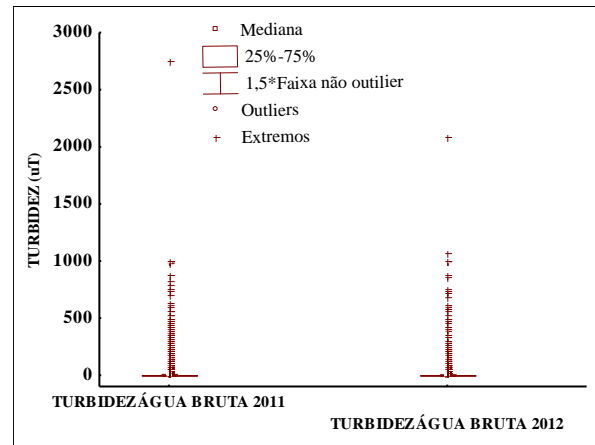
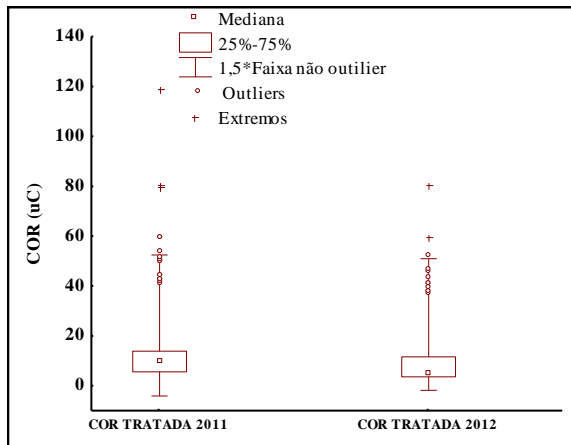
## **8. ANEXOS**



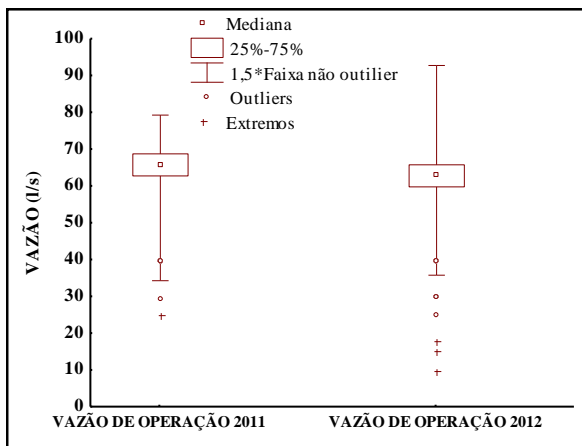
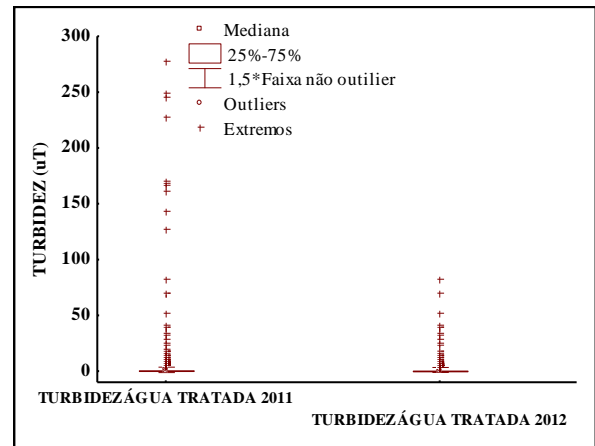
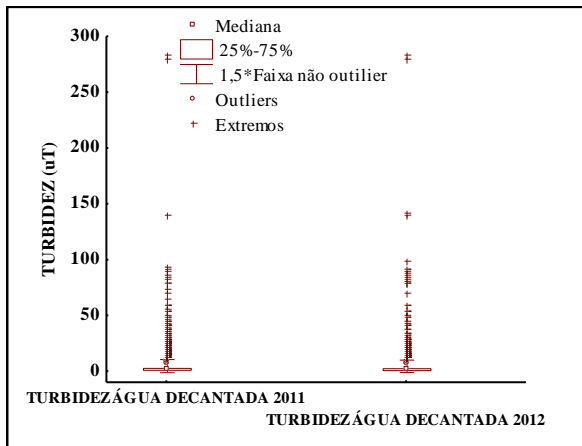
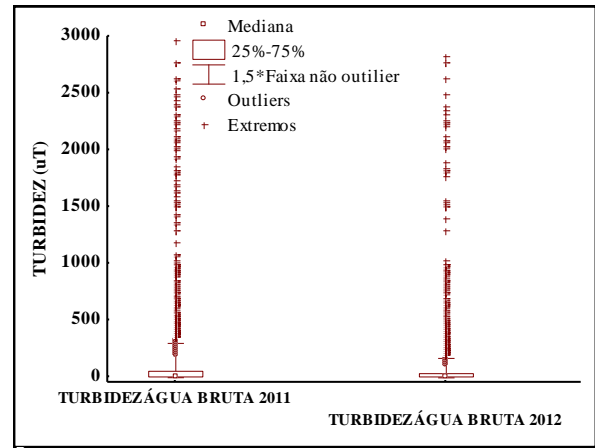
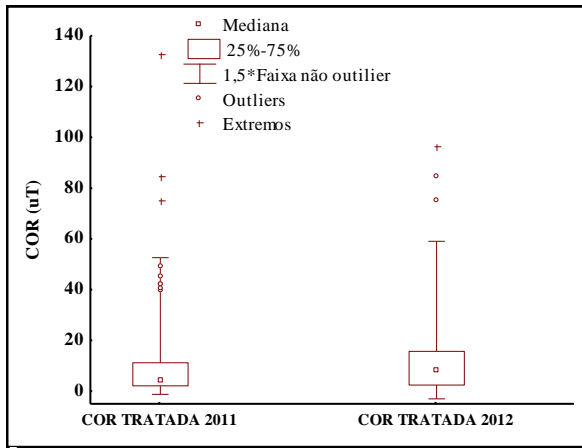
## ANEXO I

### Resultados de caracterização dos dados das ETA, mostrando a análise exploratória interquartil.

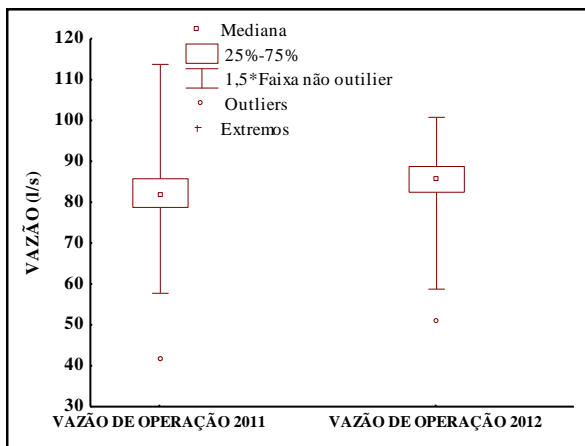
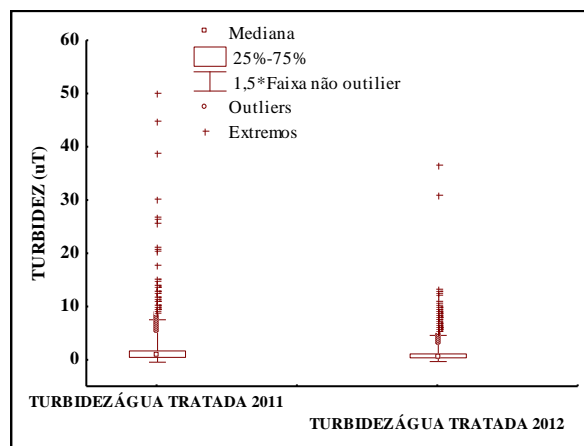
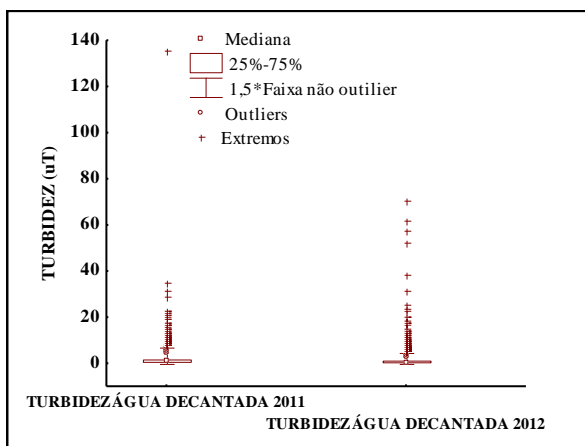
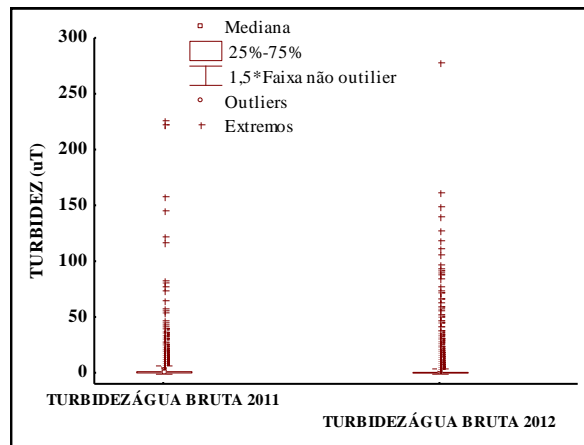
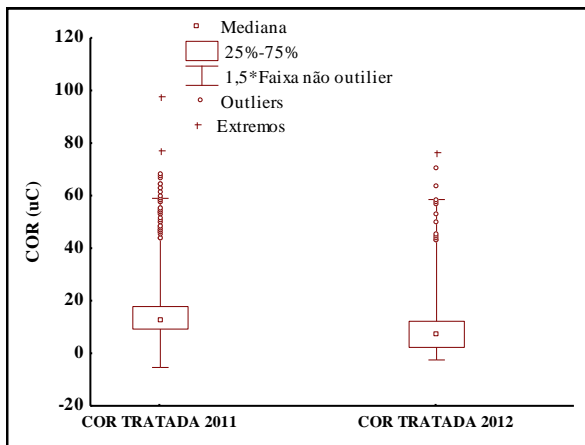
#### ETA I



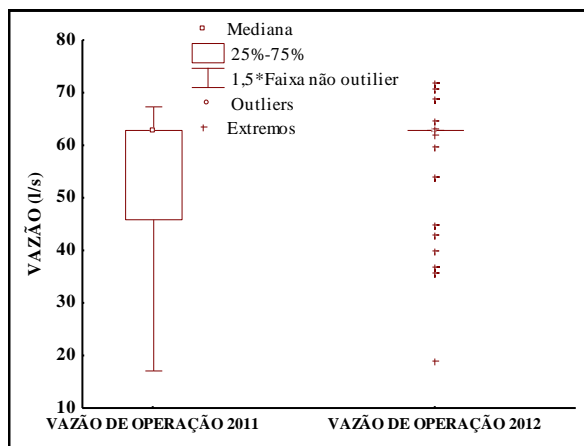
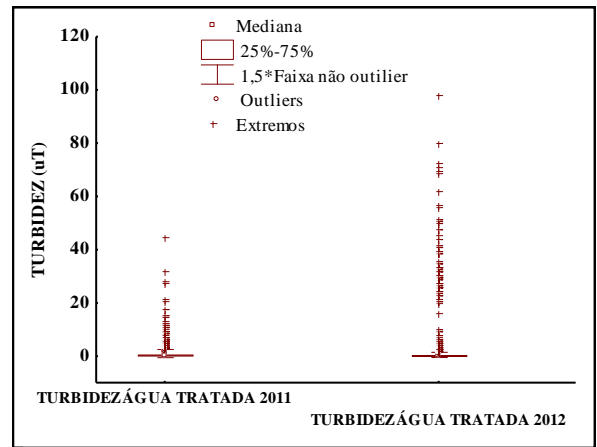
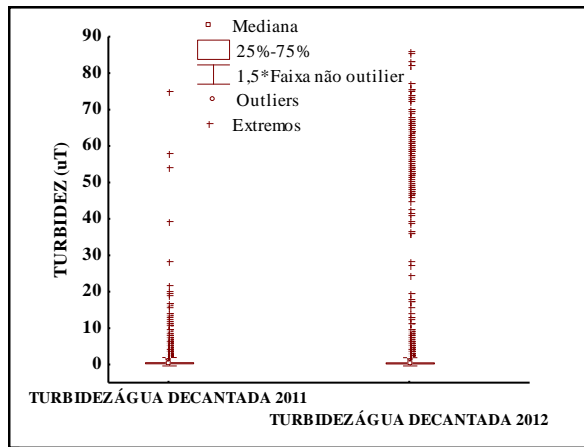
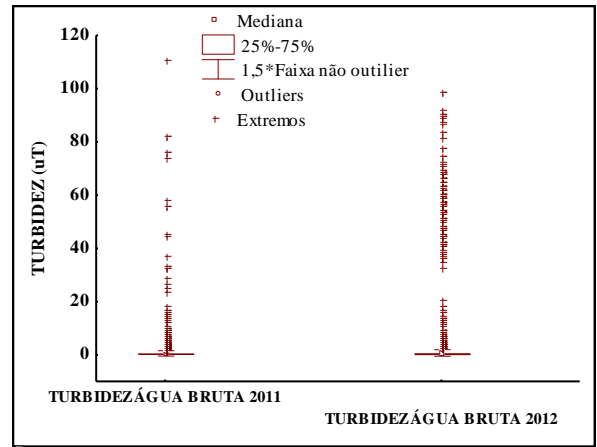
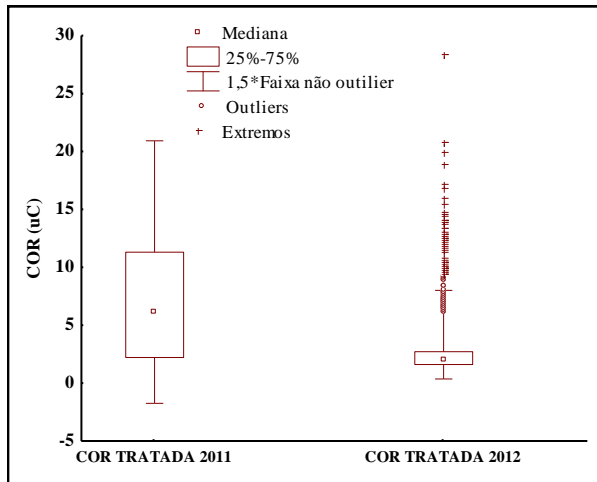
## ETA II



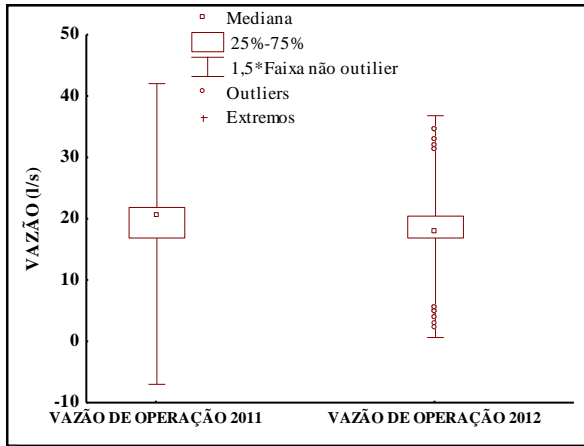
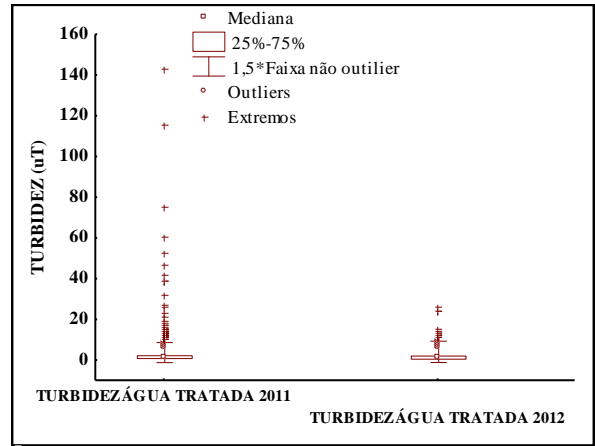
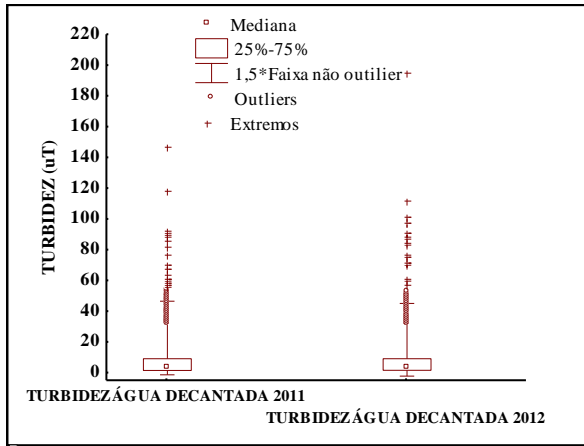
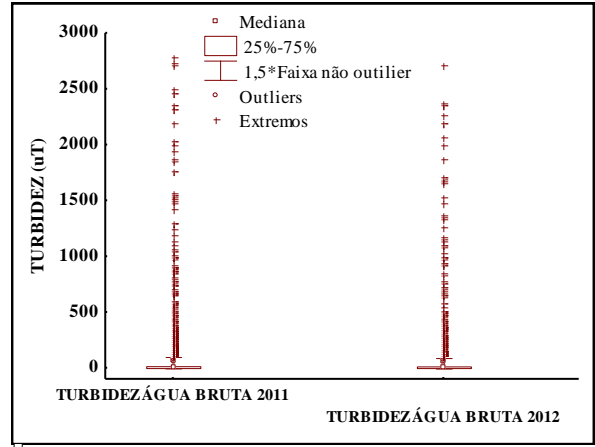
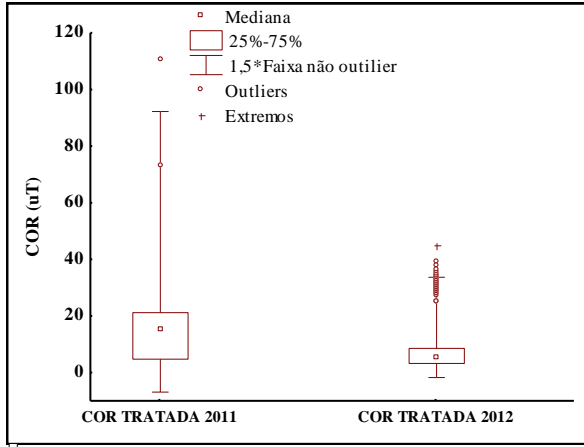
### ETA III



# ETA IV



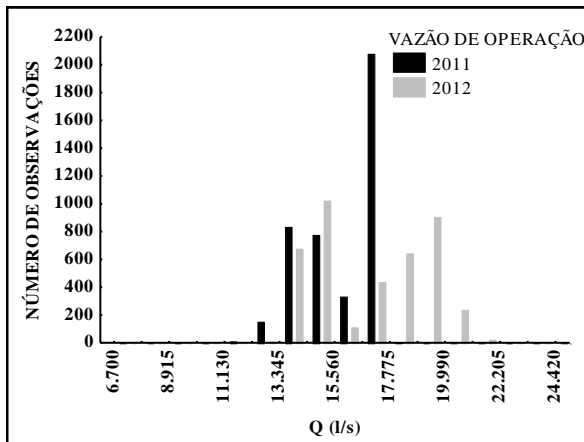
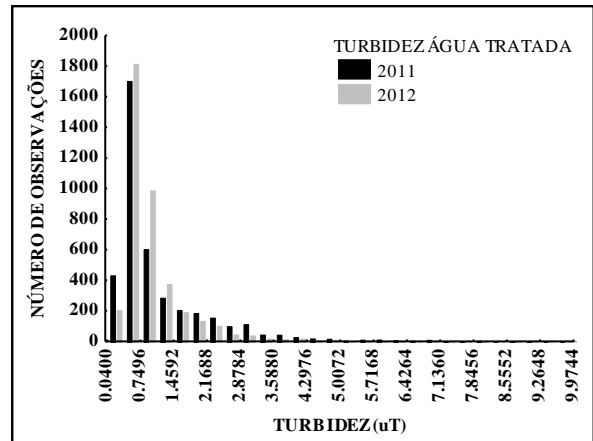
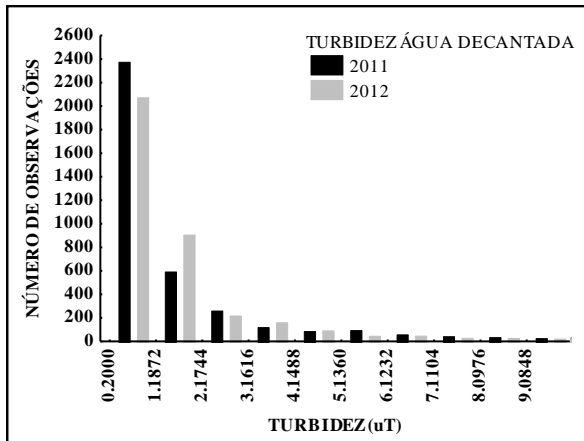
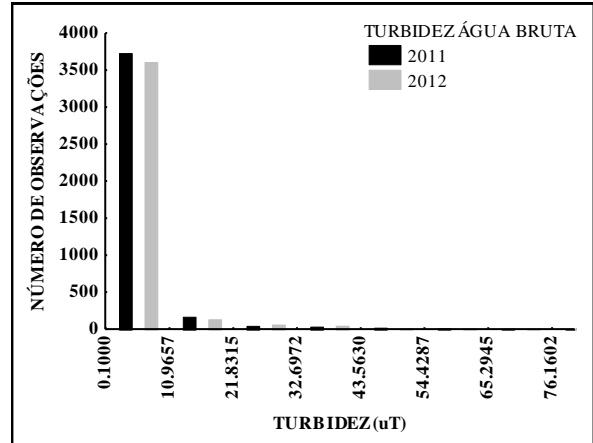
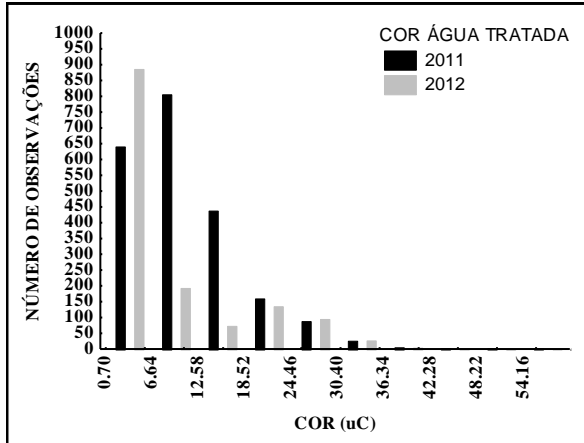
ETA V



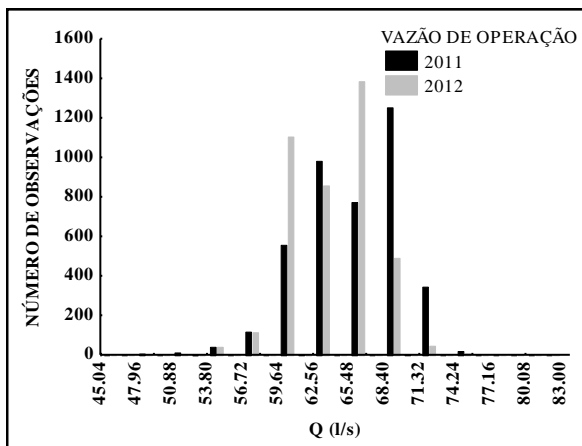
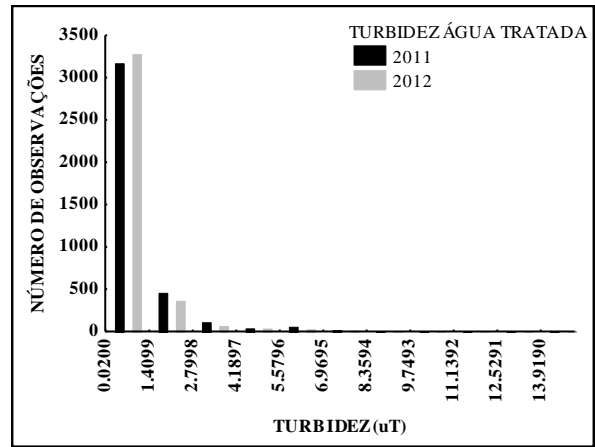
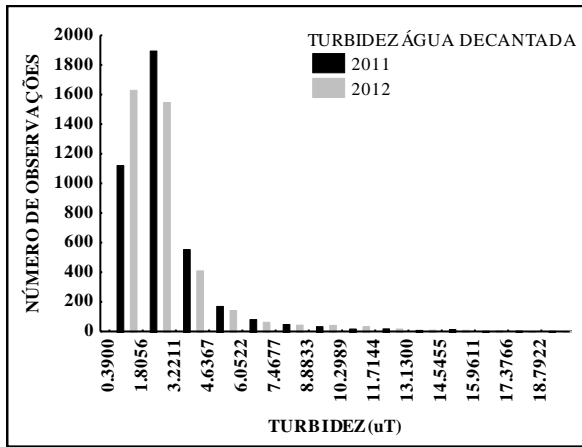
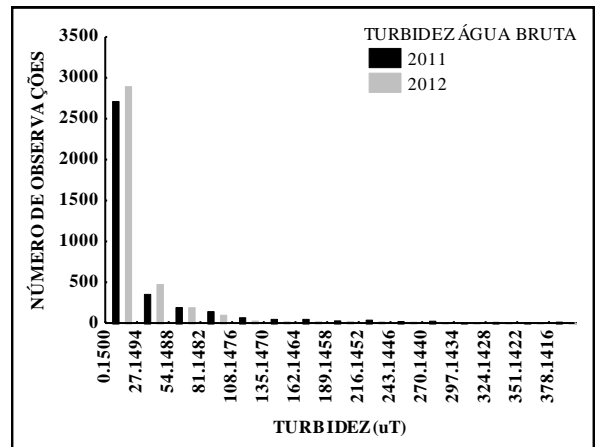
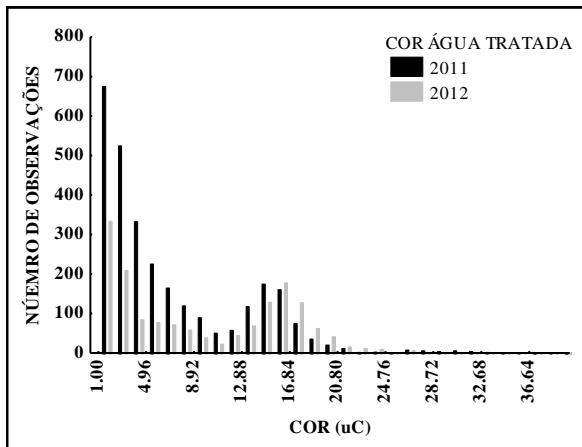
## ANEXO II

### Distribuição dos dados representados em gráficos de frequência para cada ETA.

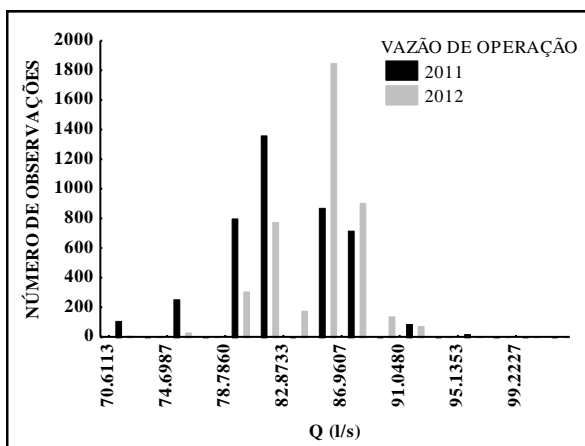
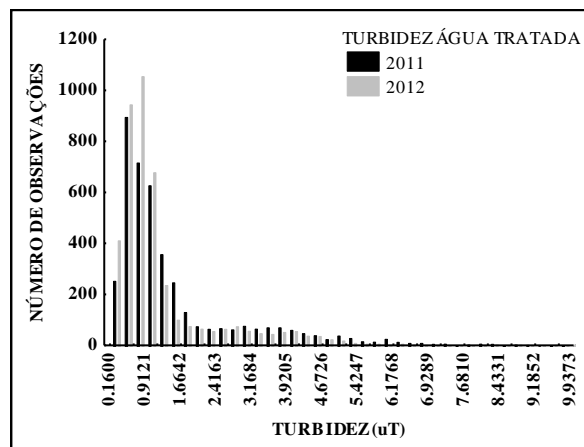
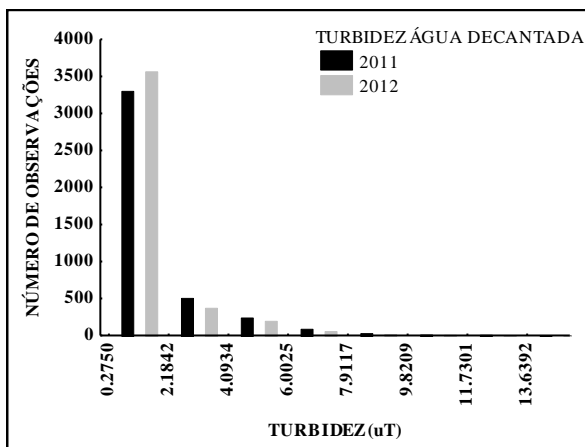
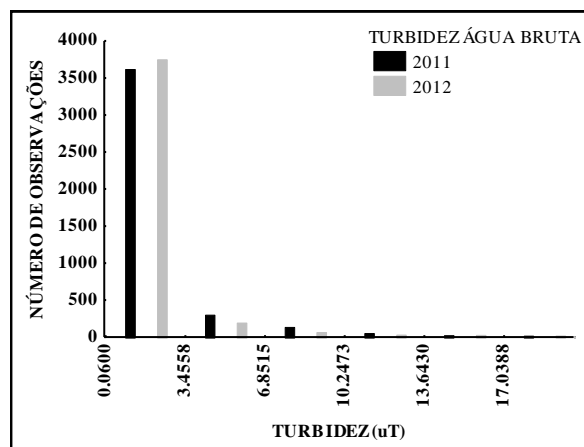
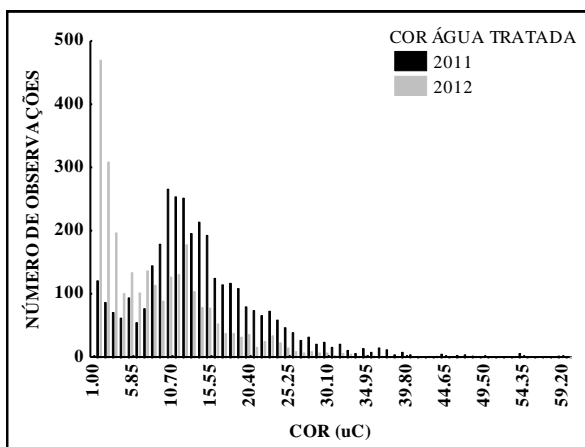
#### ETA I



ETA II

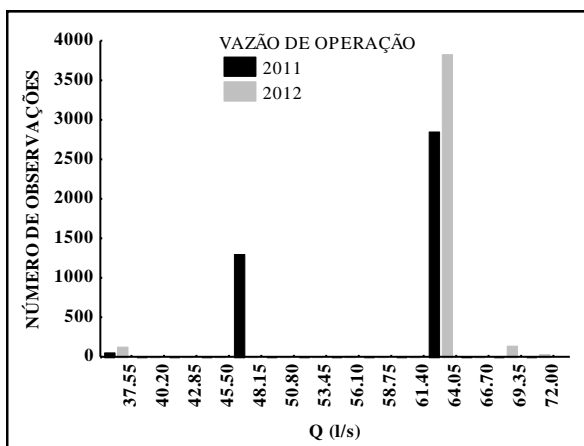
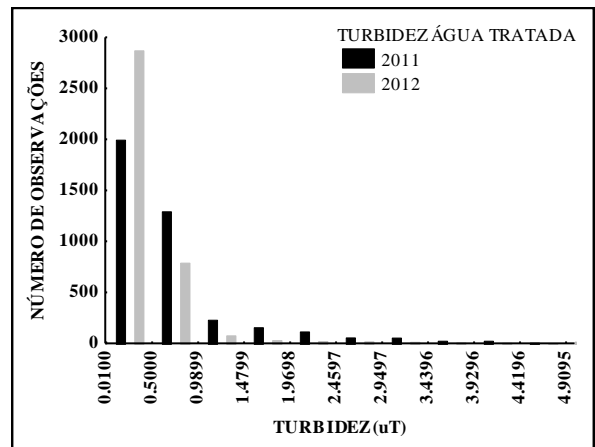
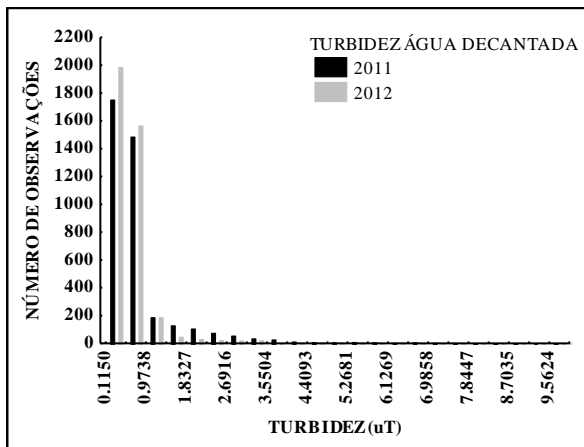
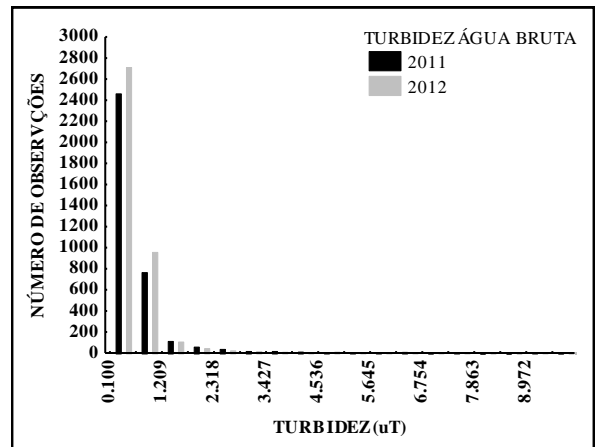
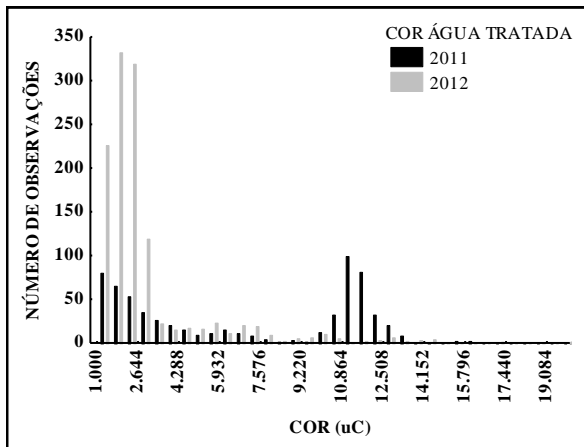


ETA III

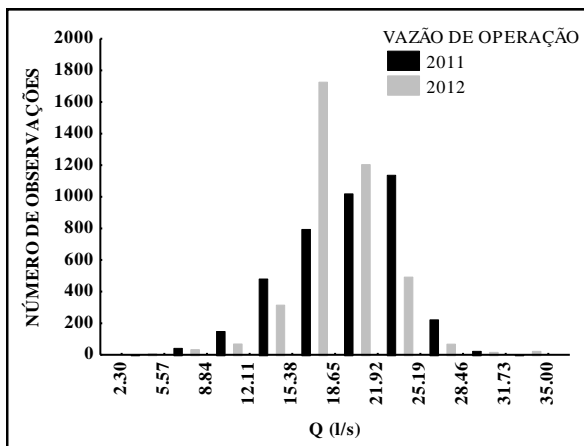
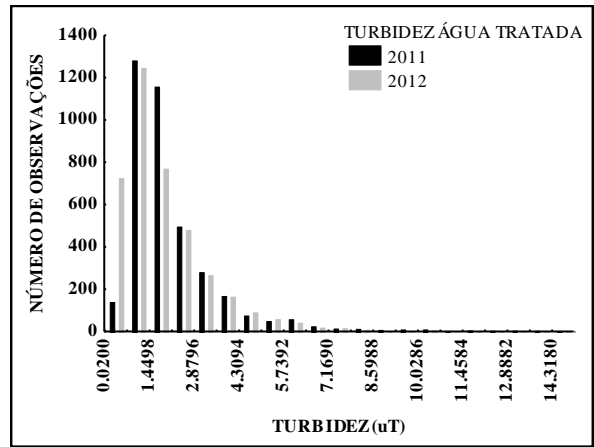
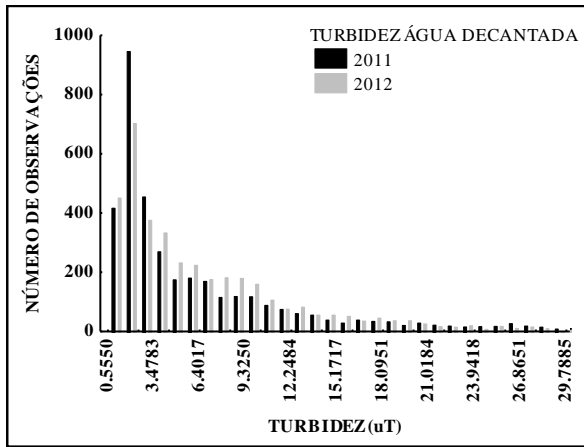
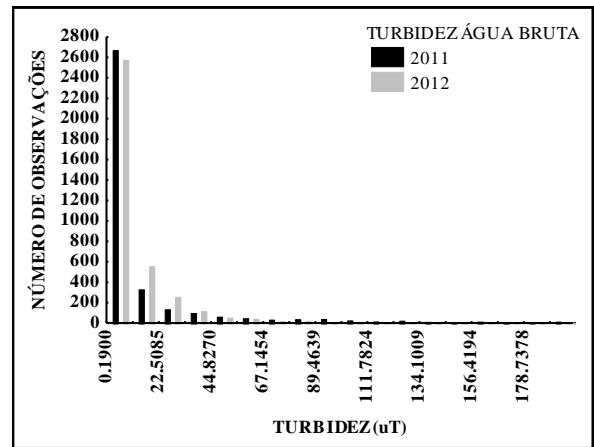
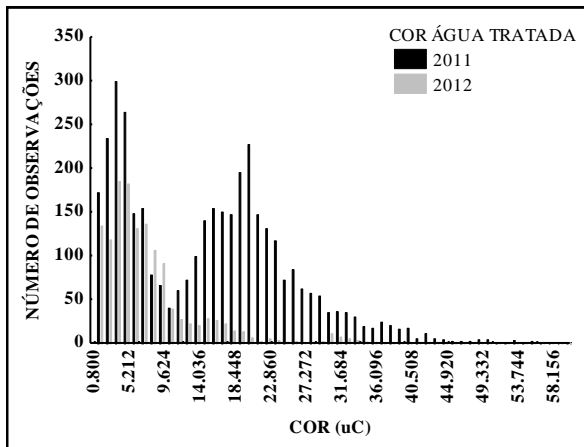




ETA IV



ETA V



### ANEXO III

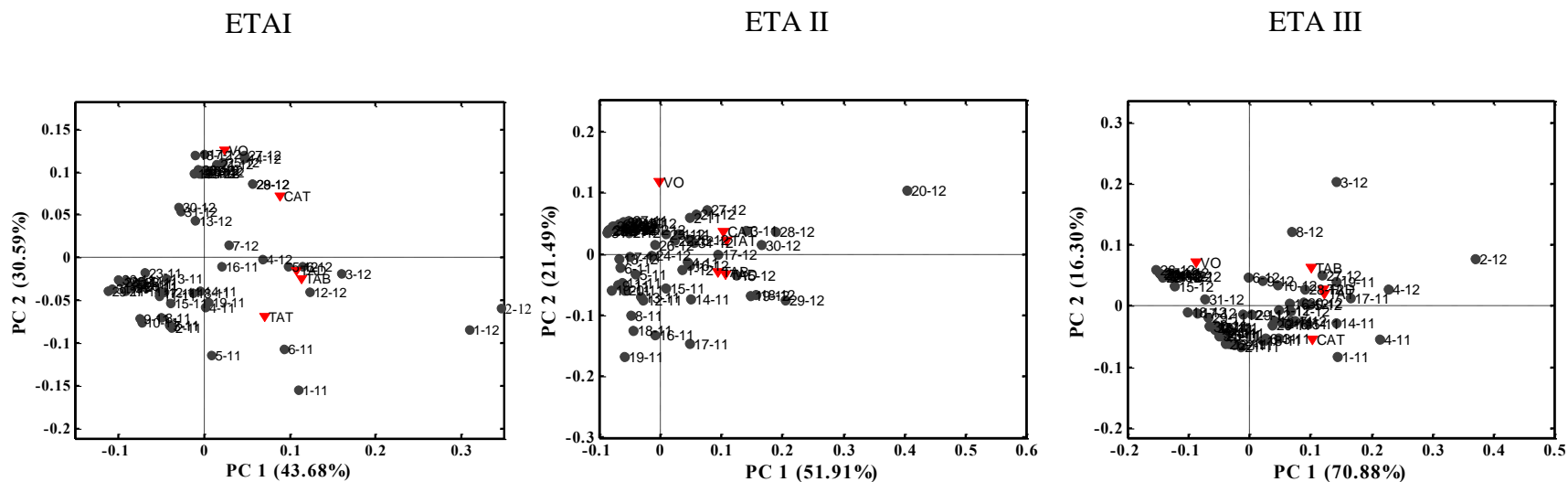
#### Figuras das Análises de Componentes Principais geradas: comparativo das Estações de Tratamento de Água agrupadas mensalmente.

\*ACP gerada desconsiderando as linhas da matriz com dados de cor da água tratada ausentes

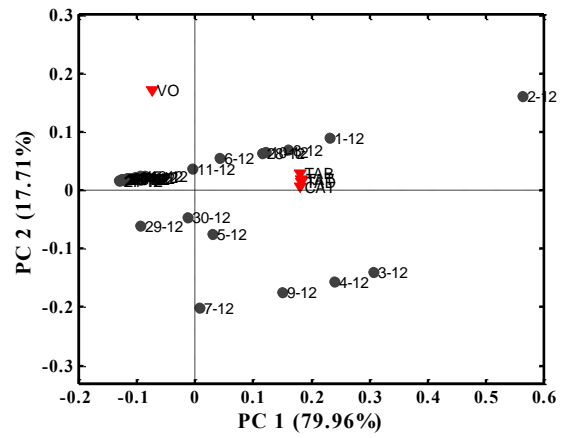
\*\* ACP gerada desconsiderando a coluna da matriz referente aos dados de cor da água tratada quando a ausência de dados de cor impediu a geração da ACP com todos os dados.

Legenda: Vazão de operação (VO); Turbidez da água bruta (TAB); Turbidez da água decantada (TAD); Turbidez da água tratada (TAT); Cor da água tratada (CAT)

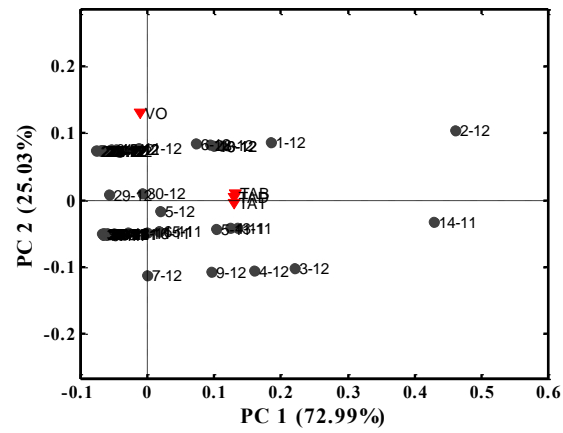
- JANEIRO



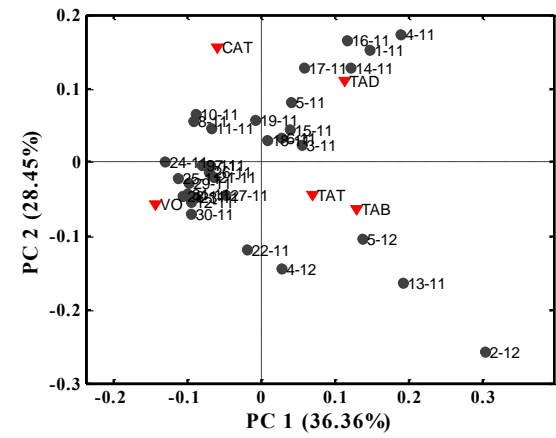
ETA IV - A\*



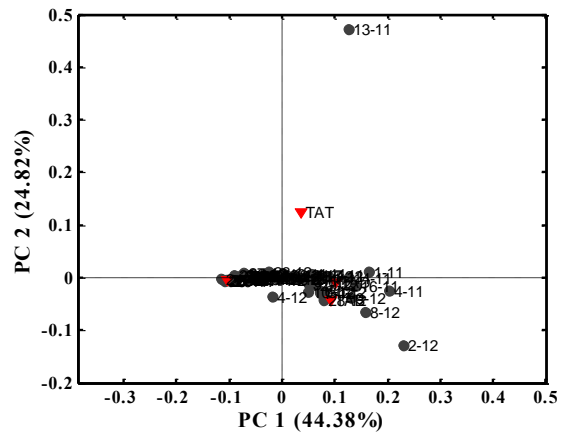
ETA IV - B\*



ETA V - A

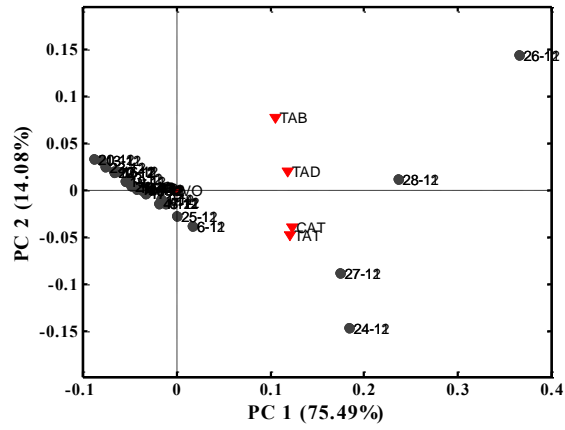


ETA V - B

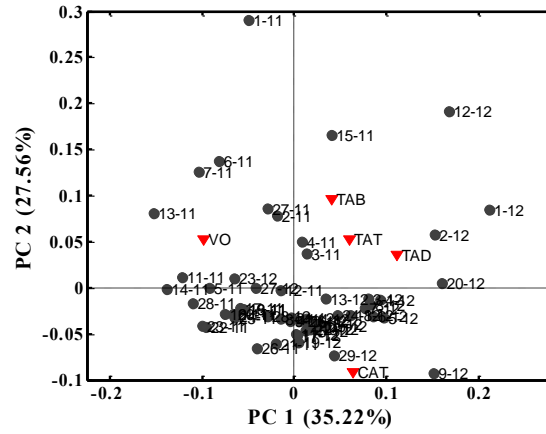


- FEVEREIRO

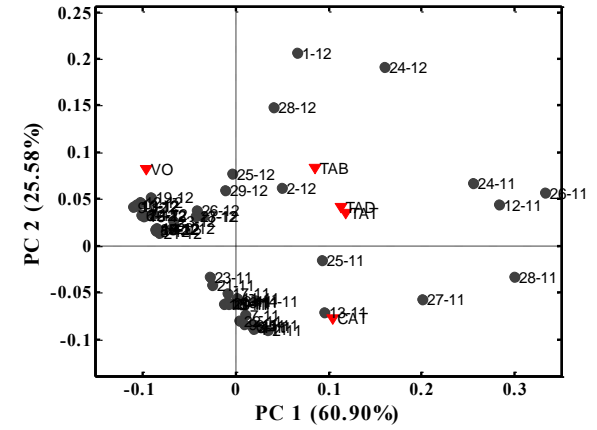
ETA I



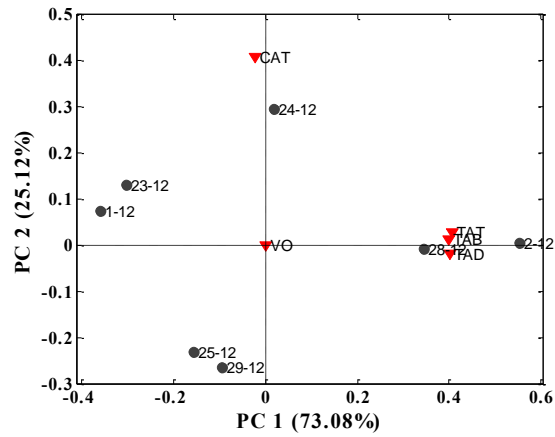
ETA II



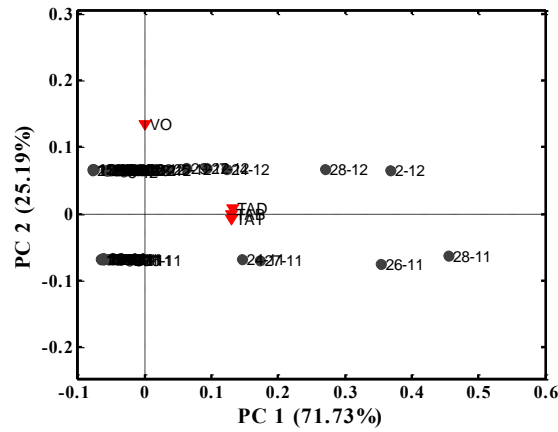
ETA III



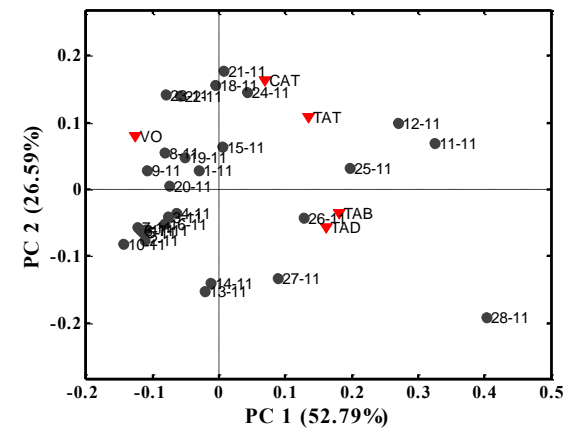
ETA IV - A



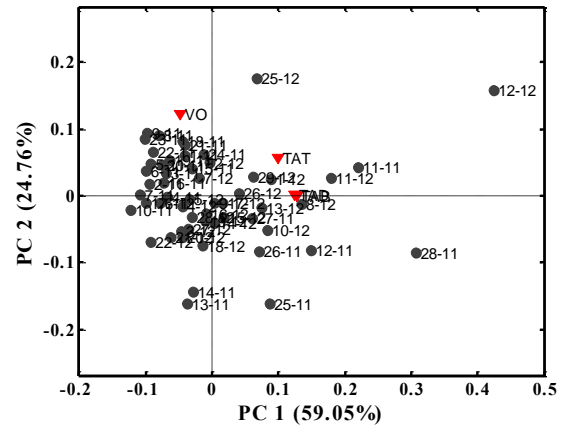
ETA IV - B



ETA V - A

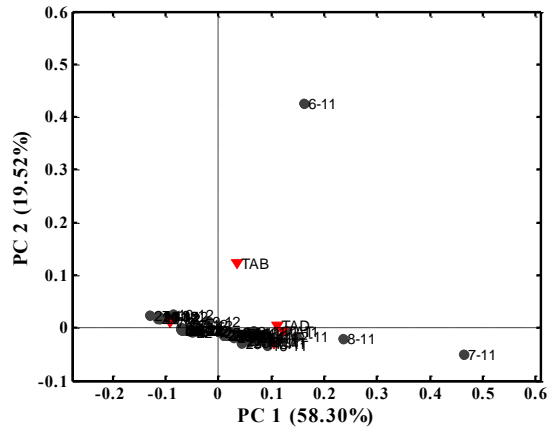


# ETA V - B

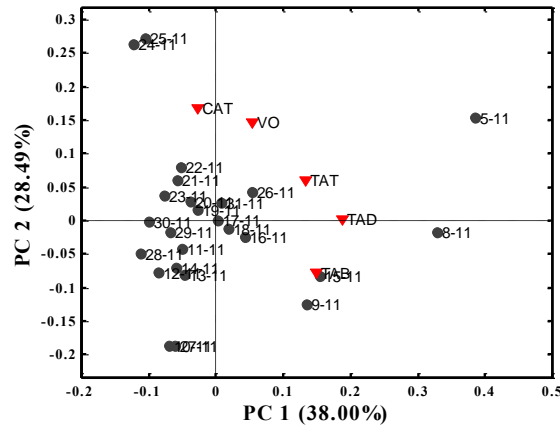


• MARÇO

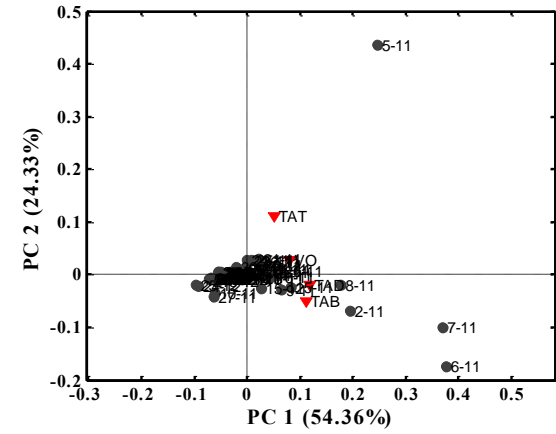
ETA I



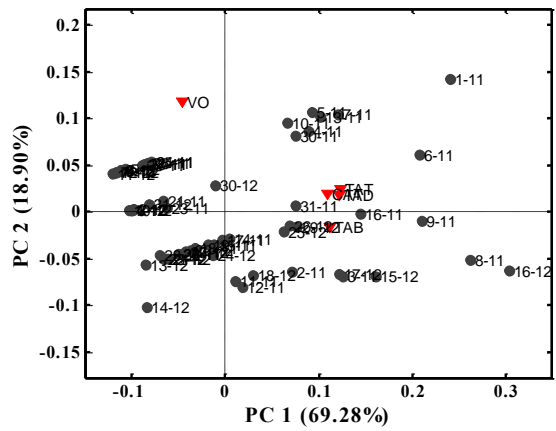
ETA II - A



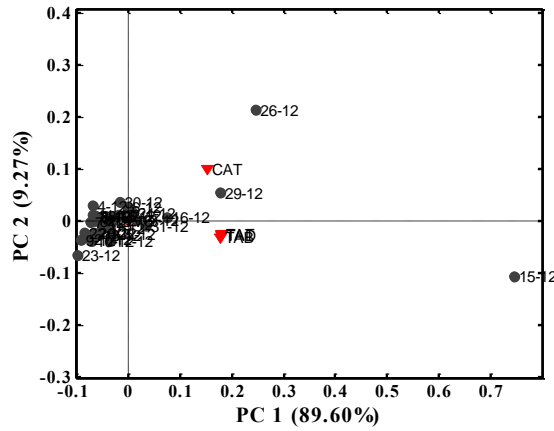
ETA II - B



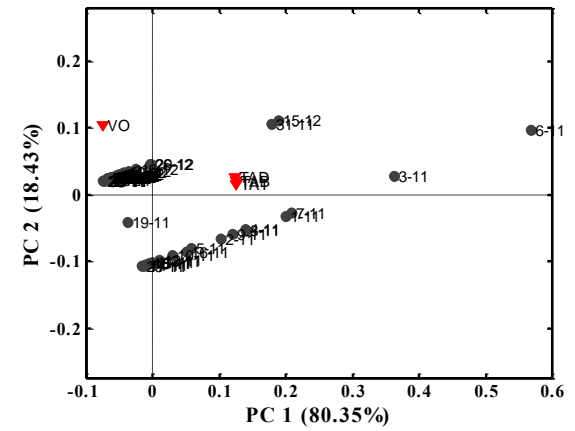
ETA III



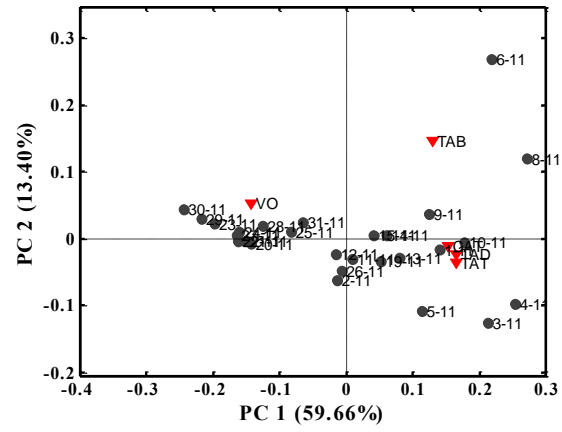
ETA IV - A



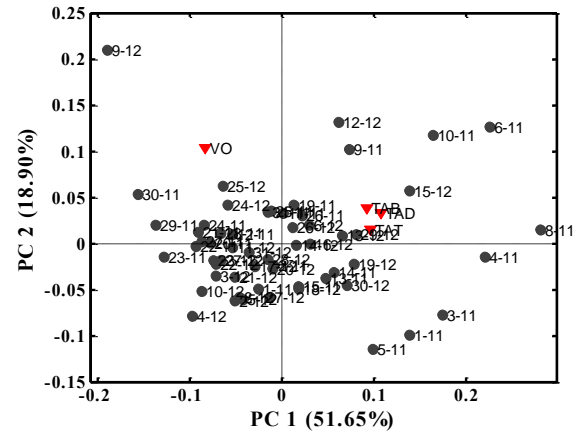
ETA IV - B



ETA V - A



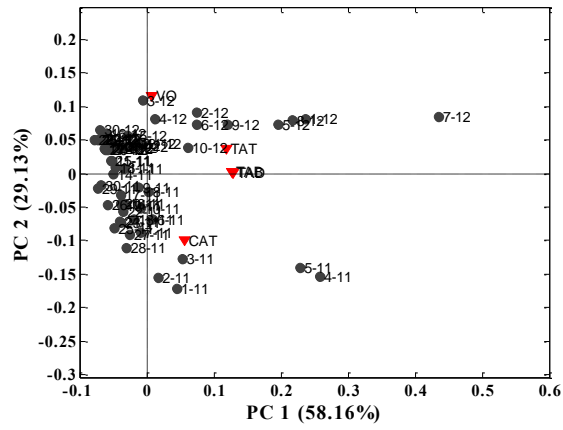
ETA V - B



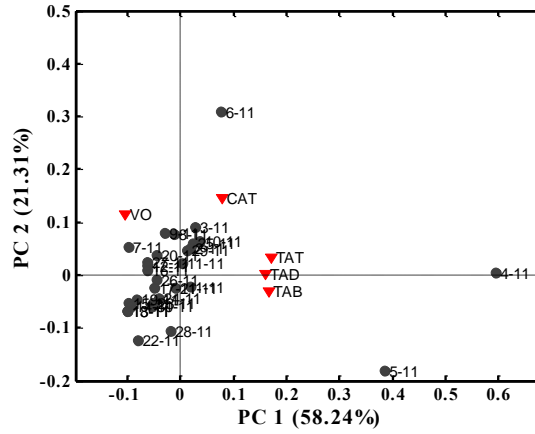


- ABRIL

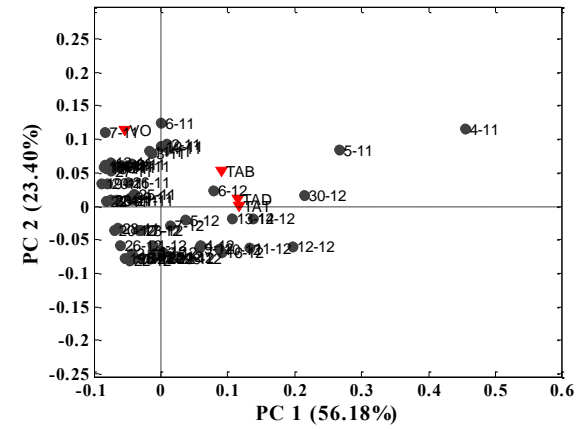
ETA I



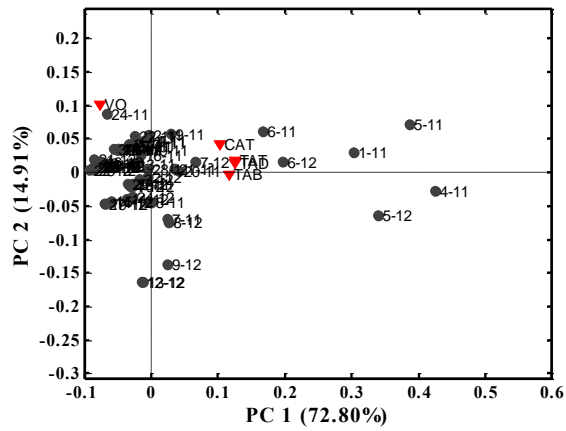
ETA II - A



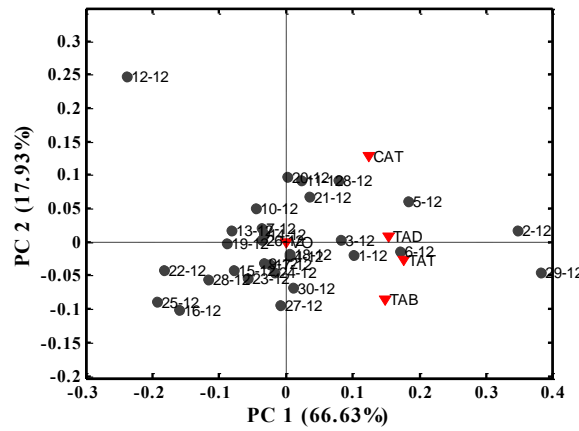
ETA II - B



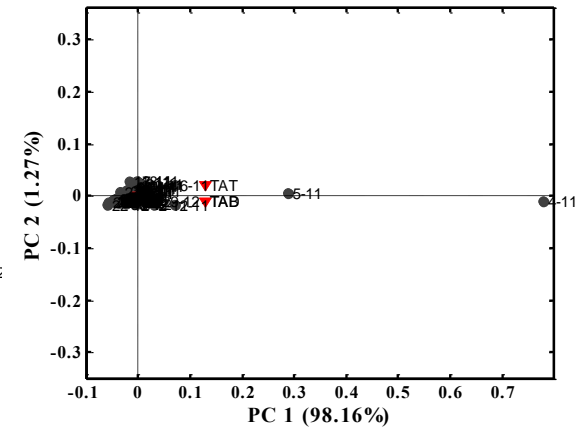
ETA III



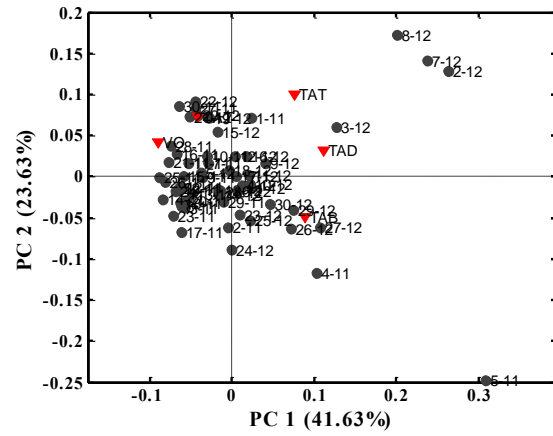
ETA IV - A



ETA IV - B

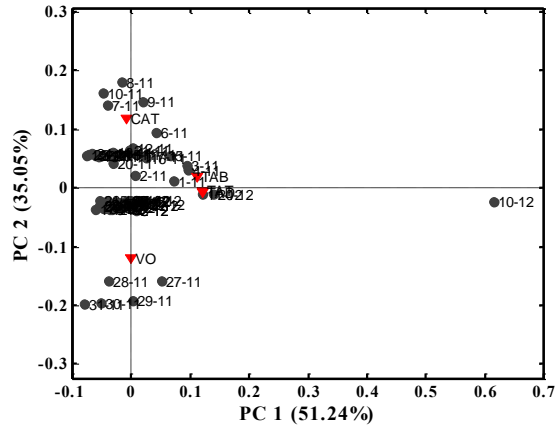


# ETA V

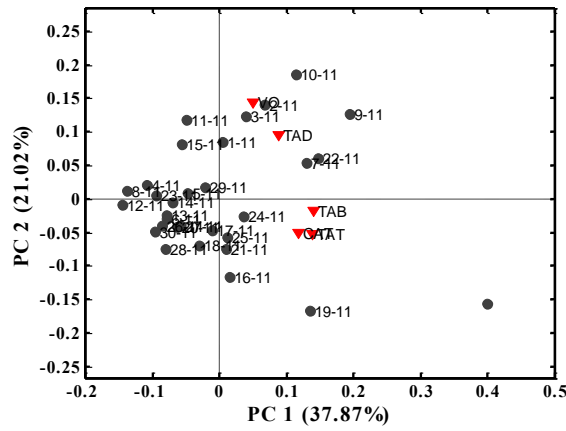


- MAIO

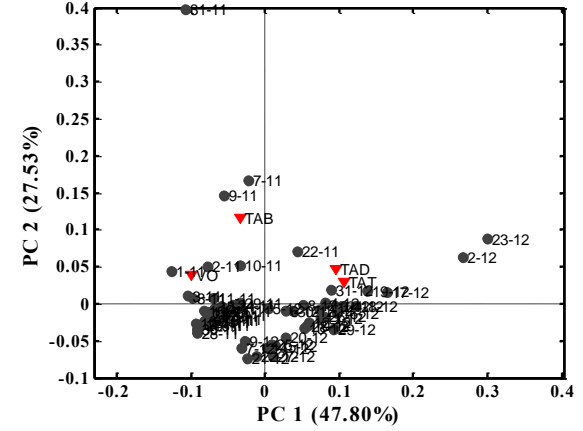
ETA I



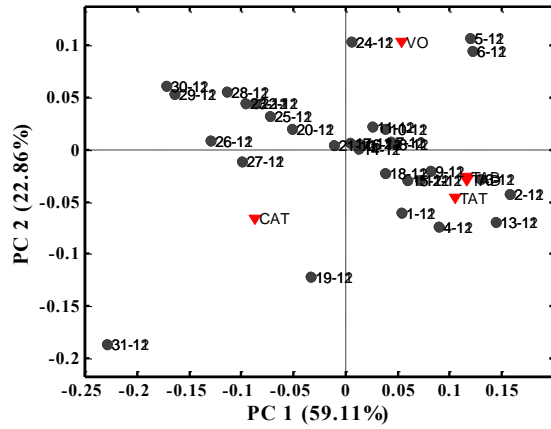
ETA II - A



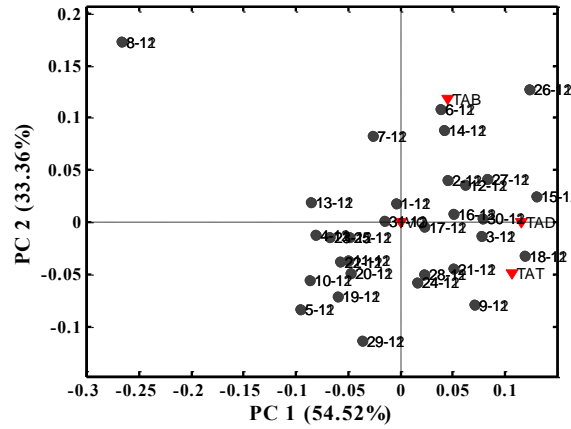
ETA II - B



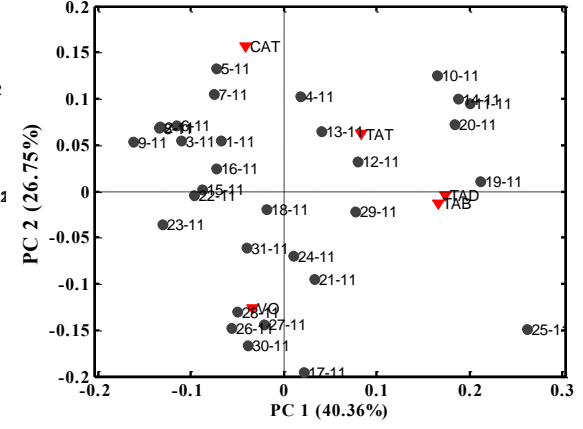
ETA III



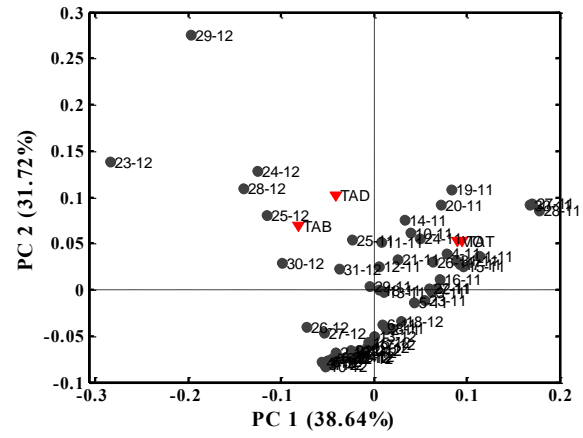
ETA IV - B



ETA V - A



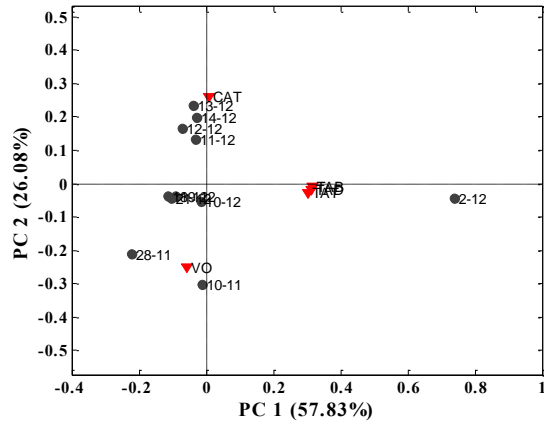
# ETA V - B



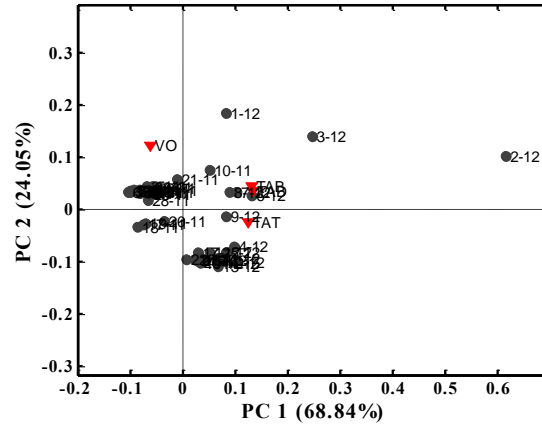
•

• JUNHO

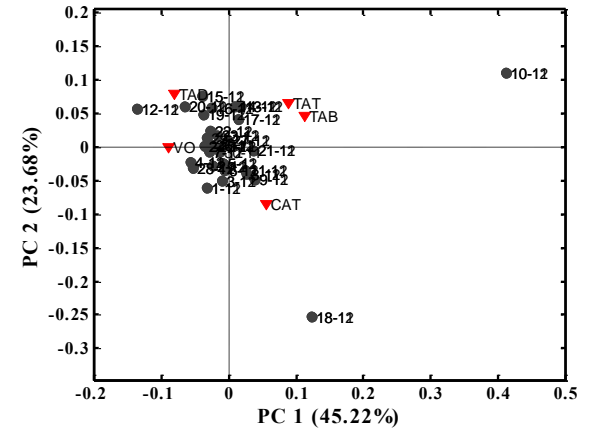
ETA I - A



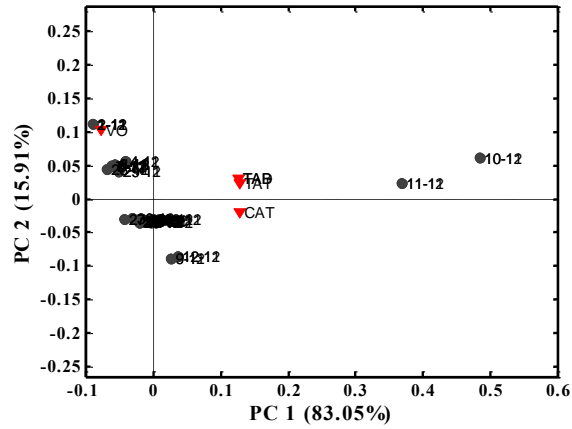
ETA I - B



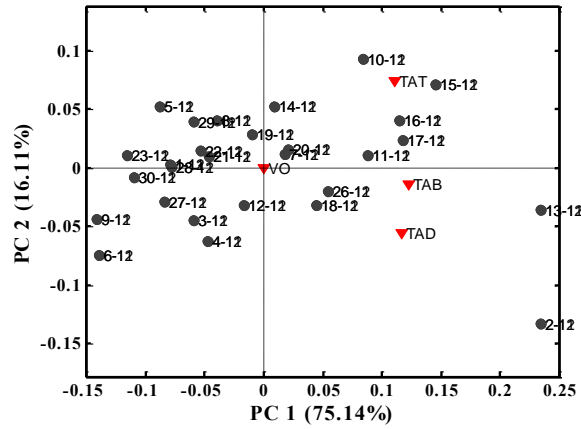
ETA II



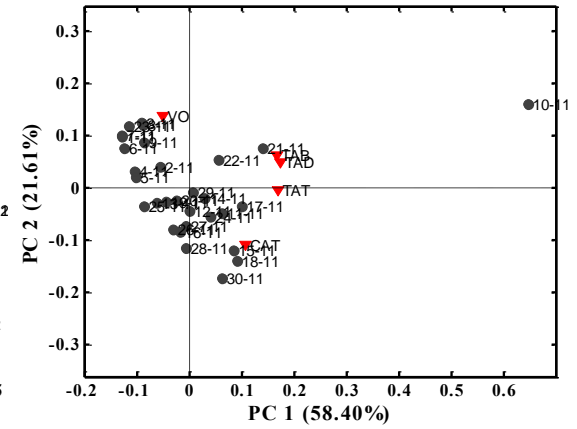
ETA III



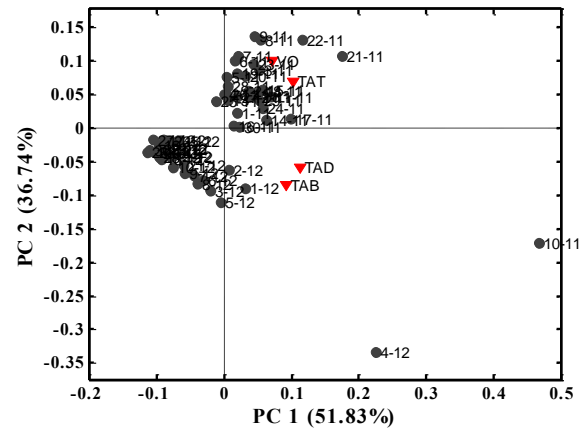
ETA IV - B



ETA V - A

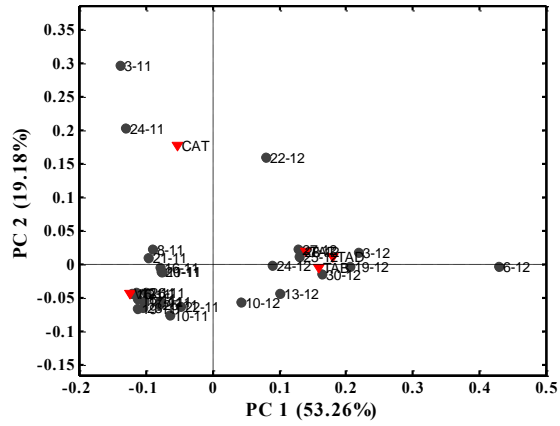


# ETA V - B

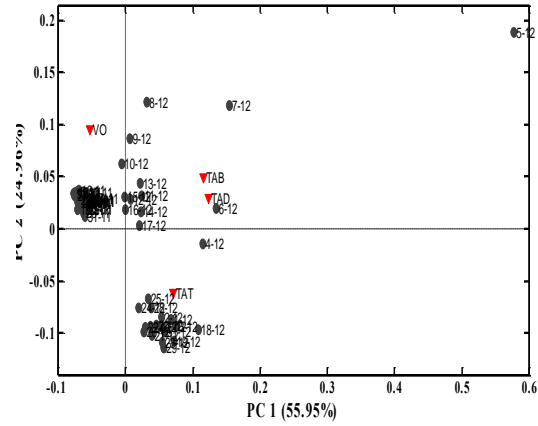


• JULHO

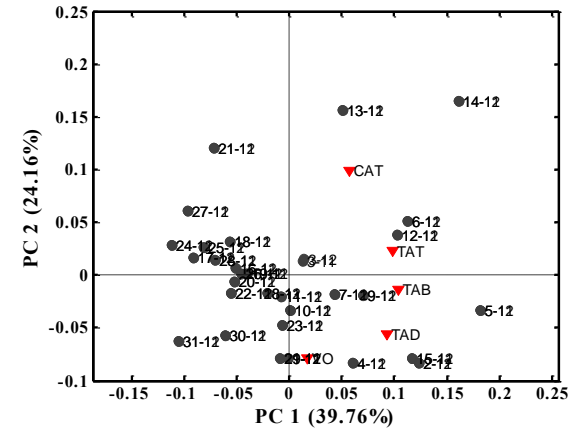
ETA I - A



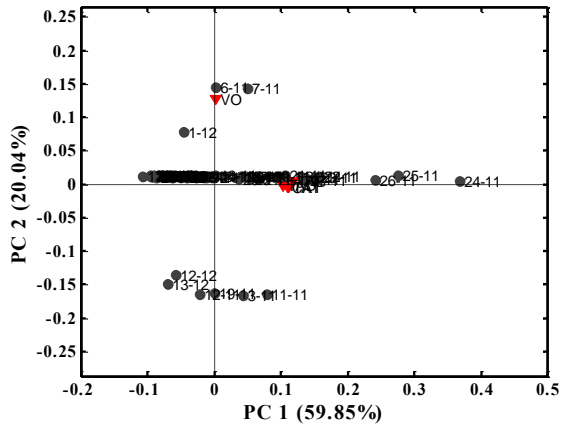
ETA I - B



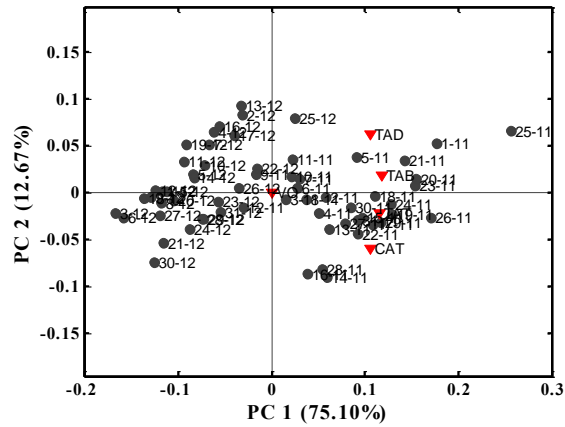
ETA II



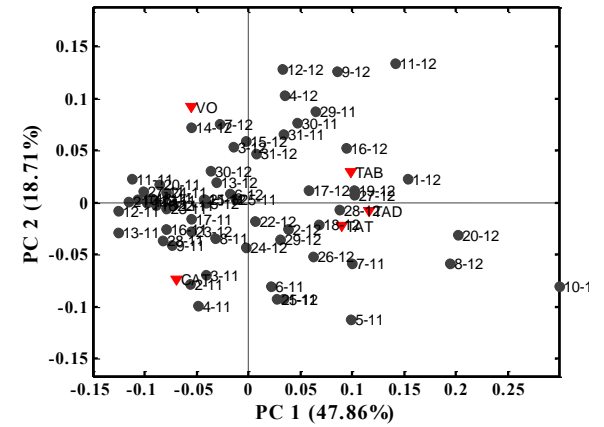
ETA III



ETA IV

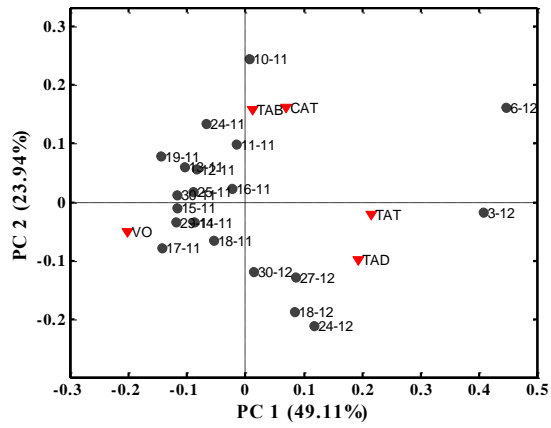


ETA V

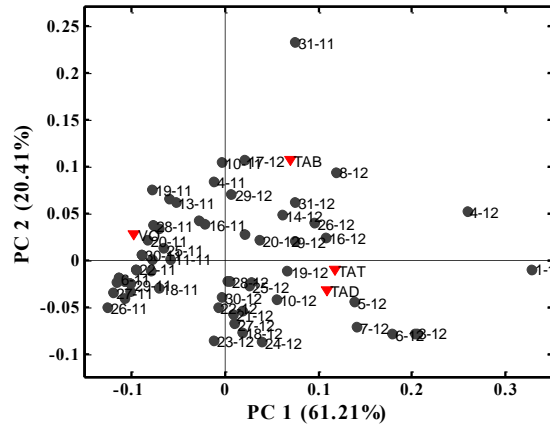


- AGOSTO

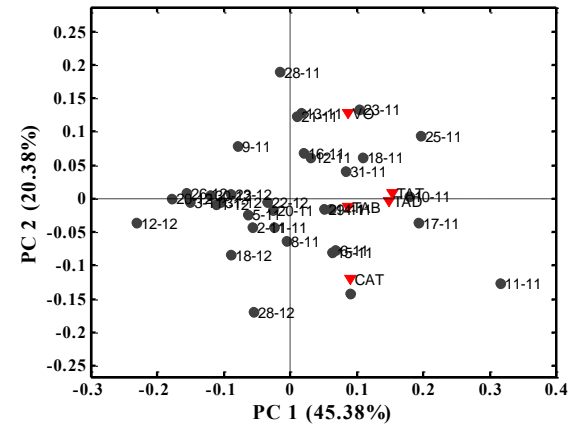
ETA I - A



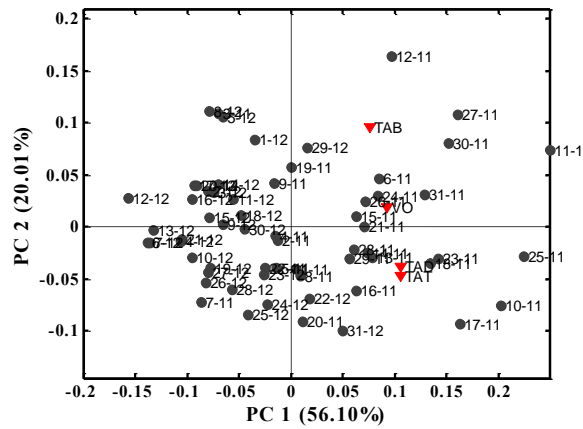
ETA I - B



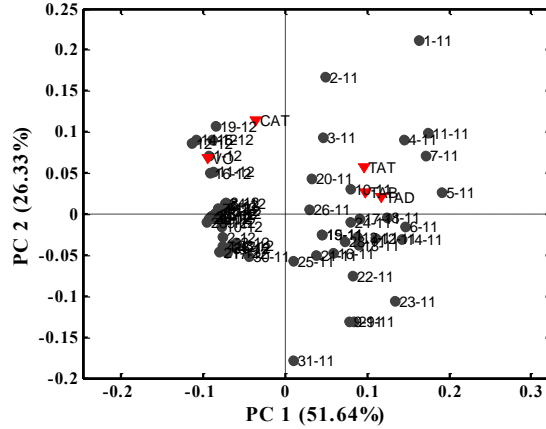
ETA II - A



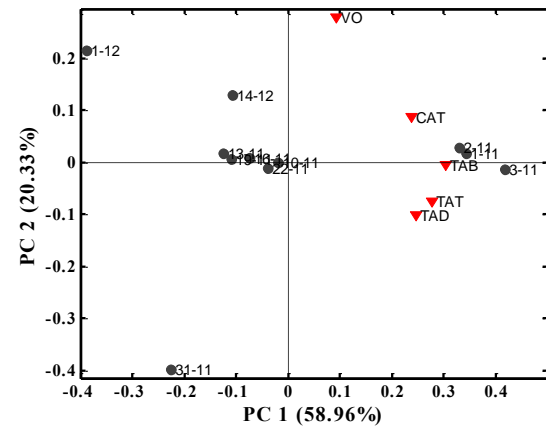
ETA II - B



ETA III

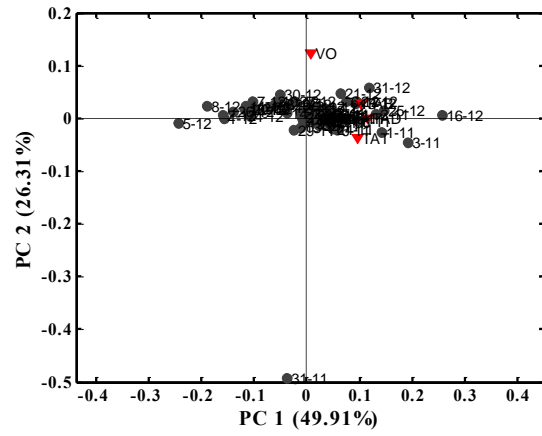


ETA IV - A

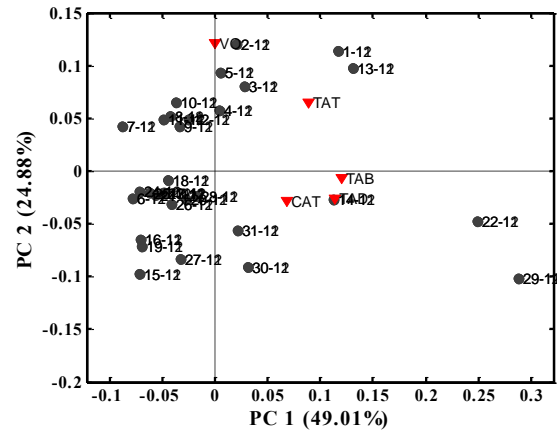




ETA IV - B

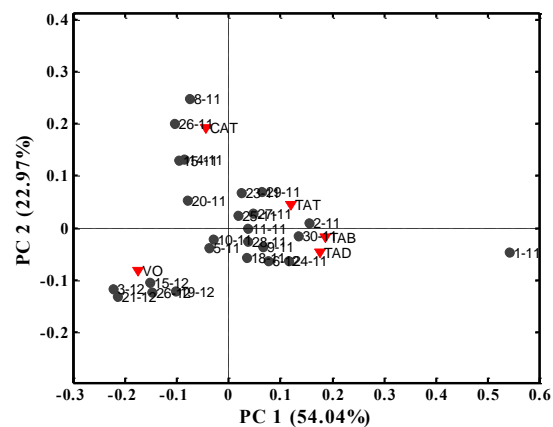


ETA V -

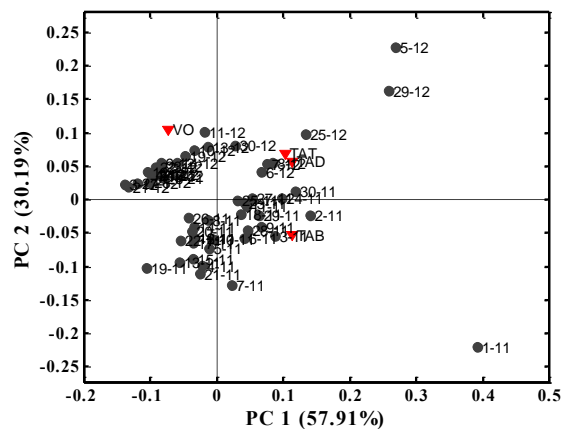


SETEMBRO

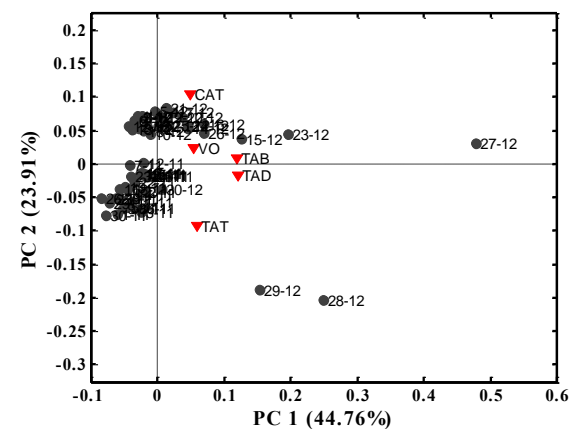
ETA I – A



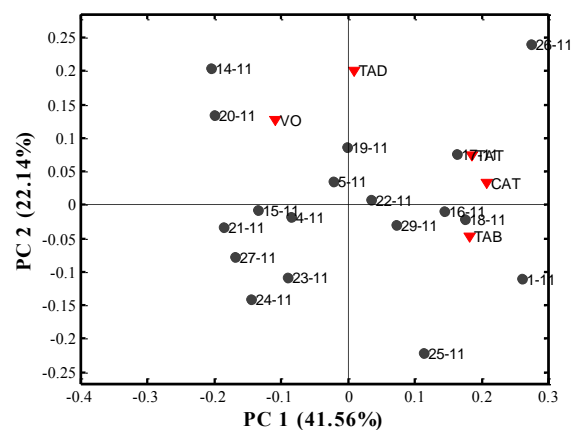
ETA I – B



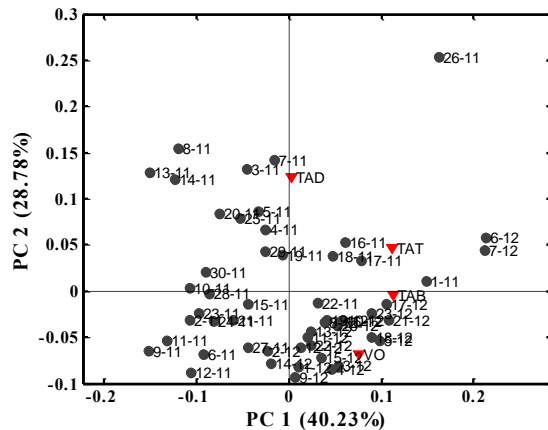
ETA II



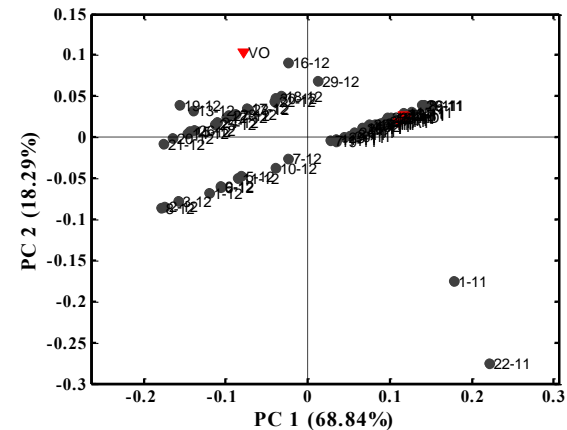
ETA III – A



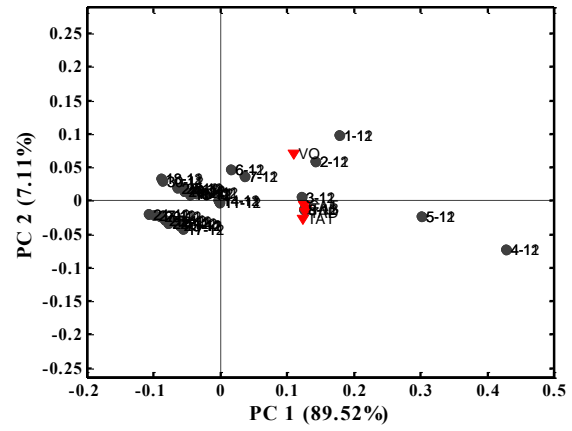
ETA III – B



ETA IV – B

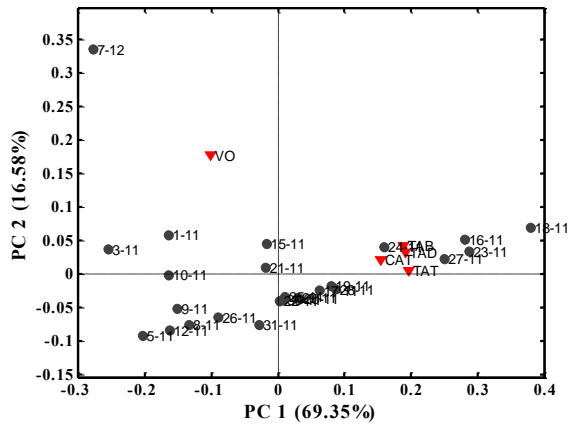


# ETA V - A

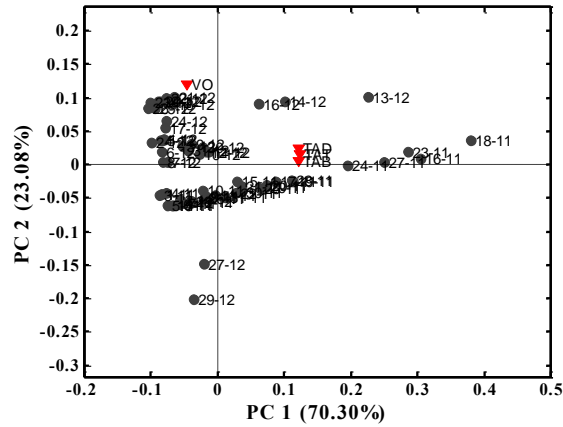


- OUTUBRO

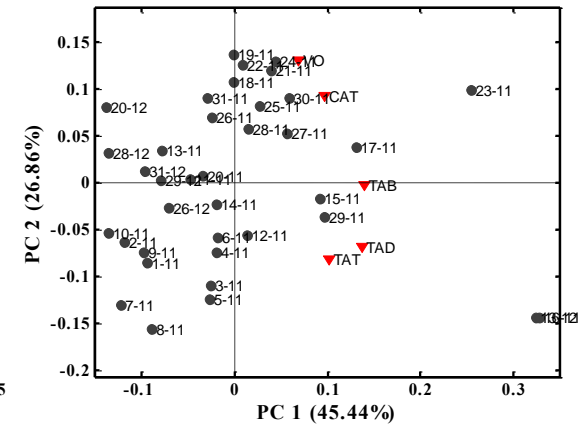
ETA I - A



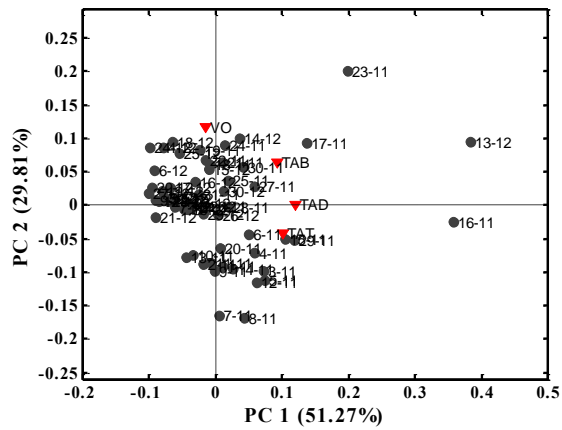
ETA I - B



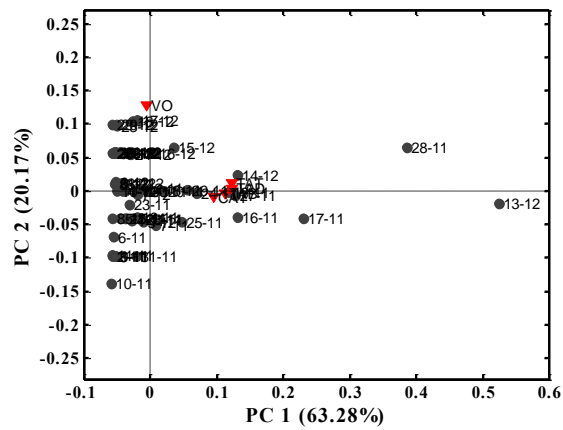
ETA II - A



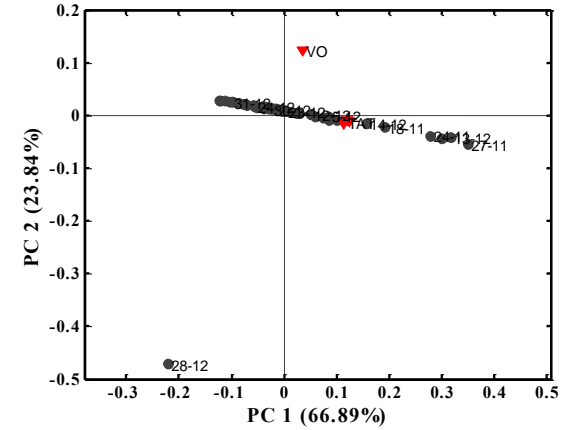
ETA II - B



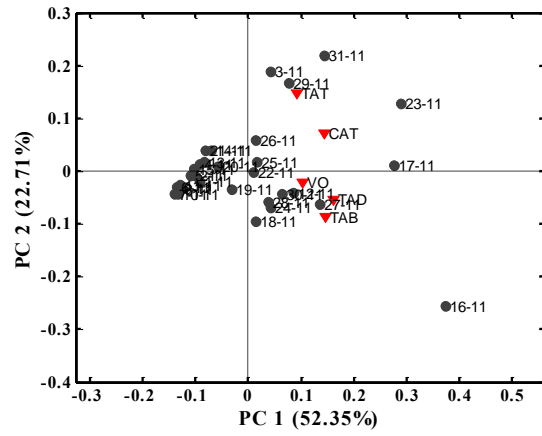
ETA III



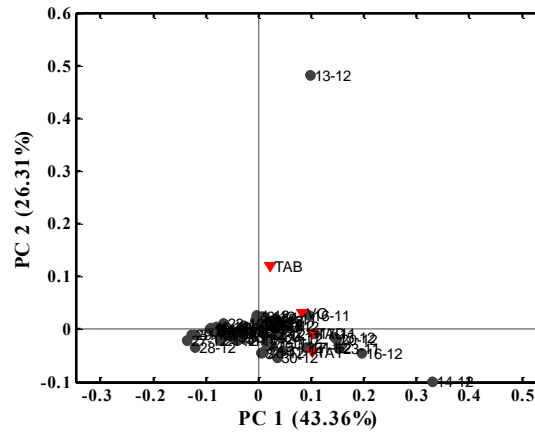
ETA IV - B



ETA V - A

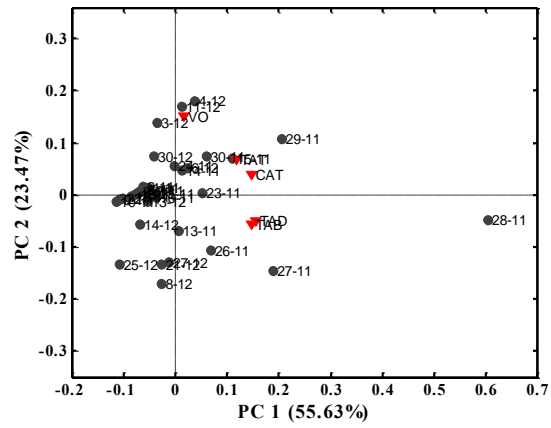


ETA V - B

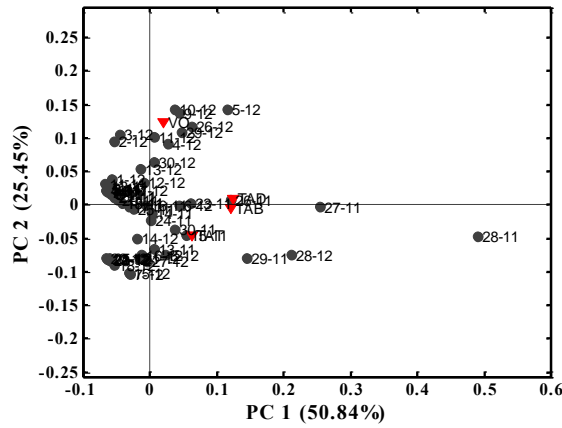


- NOVEMBRO

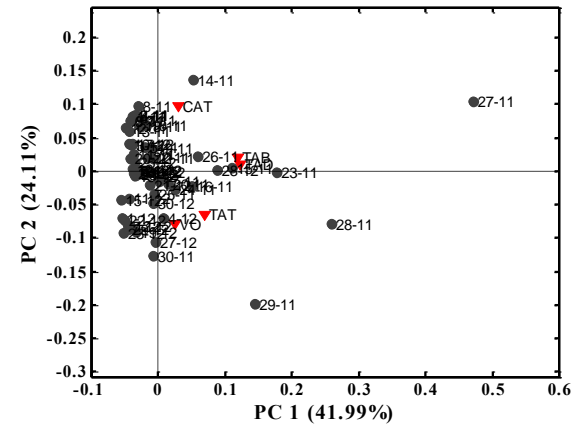
ETA I - A



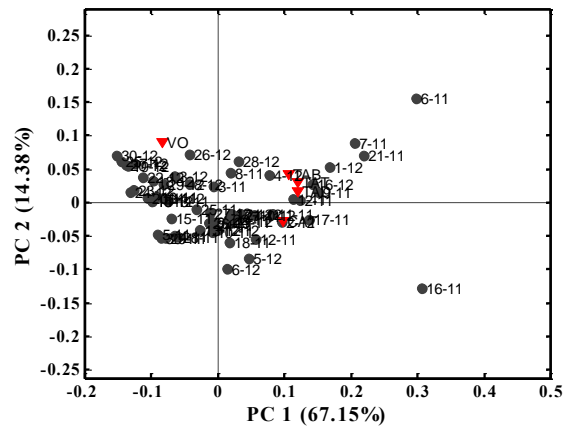
ETA I - B



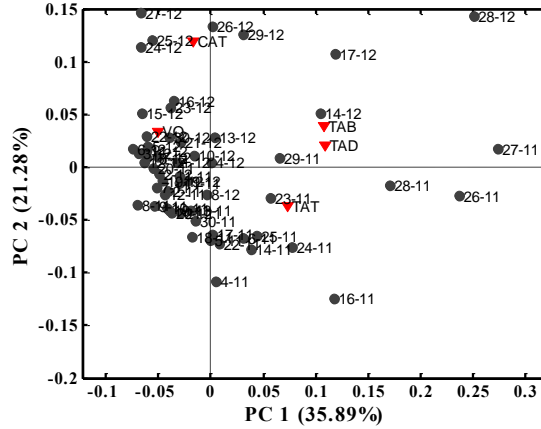
ETA II



ETA III



ETA V





# ETA V

