

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROPOSTA DE PROJETO DE GRADUAÇÃO**



LUAN NUNES DE ASSIS

**AUTOMATIZAÇÃO E PREVISÃO DE FALHAS DO SISTEMA
DE TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA POR MEMBRANAS**

**VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2016**

LUAN NUNES DE ASSIS

**AUTOMATIZAÇÃO E PREVISÃO DE FALHAS DO SISTEMA
DE TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA POR MEMBRANAS**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Celso José Munaro

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2016

LUAN NUNES DE ASSIS

**AUTOMATIZAÇÃO E PREVISÃO DE FALHAS DO SISTEMA
DE TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA POR MEMBRANAS**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em 02 de dezembro de 2016:

Prof. Dr. Celso José Munaro
Orientador

Prof. Dr. André Ferreira
Examinador

Msc. Vinicius Belmuds Vasconcelos
Examinador

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2016

Dedico este trabalho a minha esposa e filho.

Agradecimentos

A Deus.

O mais sincero agradecimento a meu pai, que foi tão responsável por este trabalho quanto eu e soube ser o melhor exemplo de garra que conheço; aos meus irmãos que sempre souberam ser pacientes e colaborativos em todas as situações, inclusive naquelas mais árduas. À minha esposa Mirelli e filho Yan que soube dar apoio moral e suporte mesmo quando o trabalho parecia ser interminável e o tempo insuficiente.

Tive a grande oportunidade de trabalhar com pessoas que se comprometeram com a discussão científica séria e imparcial, e que não pouparam esforços para entregar as melhores soluções. Sou muito agradecido aos Professores Celso J. Munaro e Ricardo F. Gonçalves pela excelente orientação que tive durante este percurso, que modificaram minhas perspectivas e visão no que tange desenvolvimento científico.

Aos colegas do Núcleo Águas, em especial a Gustavo Ferreira, Nelson Lucas, Demétrio Sabino, Gisele Gavazza, Larissa Miranda, agradeço as discussões ricas e esclarecedoras que tivemos aos incontáveis suportes oferecidos na montagem do sistema para conclusão do presente trabalho e as inúmeras conversas no decorrer desta jornada.

Existem muitas outras pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho. Faltariam linhas para tantos nomes, apesar disto minha gratidão não é menor em nenhum momento.

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo viabilizar a automatização do sistema de tratamento residencial de água cinza, agregando valor ao sistema de tratamento, possibilitando que os mesmos sejam utilizados nas residências, reduzindo o consumo de água potável onde a utilização da mesma não se faz necessário.

Este trabalho também apresenta técnicas baseadas na teoria estatística, destacando-se a carta de controle univariável e multivariável para detecção de falhas do sistema, eliminando a exposição dos usuários a patologias proveniente da utilização da água de reúso contaminada e minimizando o tempo de indisponibilidade do sistema de tratamento e consequentemente indisponibilidade da água de reúso.

Palavras-chave: Reuso de água cinza, detecção de falhas, estatística T2 de Hotelling, cartas de controle.

Abstract

The objective of the present study is to make possible the automation of a residential graywater treatment system, adding value to the treatment system, allowing it to be used in residences, reducing drinking water consumption where its use is not necessary.

This study also presents techniques based on the statistical theory, highlighting the univariate and multivariate control chart for detecting system failures, thus eliminating users' exposure to pathologies derived from the use of contaminated reused water and minimizing the downtime of the treatment system and therefore the unavailability of reused water.

Key-words: Graywater reuse. Fault detection, statistic T2.

Lista de ilustrações

Figura 1 - Crescimento populacional de 1700 a 2010.	2
Figura 2 - Detalhe interno do sistema de tratamento.....	6
Figura 3 - Sistema de uso de água de chuva no jardim, lavanderia e vaso sanitário.	7
Figura 4 - Distribuição do consumo de água em unidade residencial unifamiliar.	7
Figura 5 - Custo anual de manutenção com base no PIB (milhões de reais).....	10
Figura 6- Função de distribuição de probabilidade gaussiana univariada.	16
Figura 7- Representação gráfica dos erros do tipo 1 e do tipo 2.	18
Figura 8 - Carta univariada de Shewhart.	18
Figura 9 - Elipse de controle da estatística multivariada.	20
Figura 10 - Função de densidade de probabilidade gaussiana multivariada.	22
Figura 11 - Elipses de controle para significância de 68% e 95%.....	23
Figura 12 - Componentes do sistema de tratamento.....	27
Figura 13 - Sistema de tratamento de água cinza.	28
Figura 14 - Operação em produção de água de reúso.....	29
Figura 15 - Operação de filtração.	29
Figura 16 - Interface do supervisor para o processo de tratamento.	31
Figura 17 - Processo operando normalmente para o set-point estabelecido.....	33
Figura 18 - Potência consumida.	34
Figura 19- Volume gerado X Volume consumido.	35
Figura 20 - Pressão de operação com membrana saturada.	36
Figura 21 - Pressão de operação com membrana saturada e mantida em operação.	37
Figura 22 - Falha de ruptura da membrana.....	38
Figura 23 - Regiões de operação normal (azul) e com falha (vermelho).	39
Figura 24 - Desvio padrão para detecção de rompimento da membrana.	40
Figura 25 - Média para detecção de rompimento da membrana.	40
Figura 26 - Fator forma para detecção de rompimento da membrana.....	41
Figura 27 - Curtose para detecção de rompimento da membrana.	41
Figura 28 – Média de vazão.....	42
Figura 29 – desvio padrão da vazão.	42
Figura 30 – Fator forma da vazão.....	43

Lista de tabelas

Tabela 1 - Indicadores de disponibilidade dos processos entre 1997 e 2011.....	10
Tabela 2 - Função de cada elemento da interface.....	31

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivo Geral	4
1.3	Objetivos Específicos	4
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	5
2.1	Tratamento de água cinza com membranas de ultrafiltração	5
2.2	Dados históricos para previsão de falhas operacionais	8
2.2.1	Controle Estatístico de Processos – SPC	12
2.2.1.1	História	12
2.2.1.2	Ferramentas de SPC	13
2.2.2	Análise Estatística Univariada	14
2.2.3	Carta de Controle Univariado	18
2.2.4	Análise Estatística Multivariada	19
2.2.5	Estatística T² de Hotelling	24
3	APLICAÇÃO	26
3.1	Introdução	26
3.2	Descrição do sistema de tratamento implementado	26
3.3	Sistema de automação desenvolvido	28
3.4	Monitoramento do processo	30
3.4.1	Treinamento	31
3.4.1.1	Saturação da membrana	32
3.4.1.2	Ruptura da membrana	35
4	CONCLUSÕES	42
5	TRABALHOS FUTUROS	43
6	ALOCAÇÃO DE RECURSOS	44
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LEPAC	Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
ABRAMAN	Associação das Empresas Brasileiras de Manutenção
PCA	Principal Component Analysis
SPC	Statistical Process Control
UCL	Upper Control Limit
LCL	Lower Control Limit
COM	Condição de Operação Normal
ANI	Anomalia Não Identificada
TMPR	Tempo Médio Para Reparo
PID	Proporcional Integral Derivativo
CLP	Controlador Lógico Programável
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram/Drawing

1 INTRODUÇÃO

O combate à escassez de água, que se dissemina em várias regiões do planeta, amplia significativamente o interesse pelo desenvolvimento de tecnologias que viabilizem o seu reúso. Entre as diversas opções tecnológicas disponíveis para o tratamento de águas residuárias para efeito de reúso, os processos anaeróbios tem a vantagem da combinação da redução de matéria orgânica com produção de energia . Mesmo não sendo uma solução definitiva, devido às limitações de eficiência na remoção dos poluentes de interesse para o reúso, tais processos são peças importantes dos sistemas de tratamento biológicos; que combinam processos anaeróbios (sem oxigênio) e aeróbios (com oxigênio) em série (CAMPOS et al., 2009).

No esgoto urbano são encontradas duas principais correntes hídricas: água negra e água cinza. A água negra consiste do efluente gerado a partir de bacias sanitárias, enquanto a água cinza engloba todos os demais efluentes gerados em uma residência, com exclusão daquela oriunda de bacia sanitária (LUDWIG, 2006). O reúso de água cinza é sem dúvidas um recurso valioso em regiões de clima árido e semiárido. Particularmente em tempos de crise hídrica, seu reúso pode substituir a água potável em empregos que requerem qualidade menos restritiva, como descarga de bacias sanitárias, irrigação de plantas e lavagem de áreas comuns, contribuindo no controle a escassez de água e, conseqüentemente, promovendo sua conservação em residências (NGHEIM; OSCHMANN e SCHAFFER, 2006).

Contudo, a reutilização da água a partir de estações de tratamento de esgoto centralizadas, ou seja, todo esgoto urbano gerado é direcionado e tratado pela concessionária local, demandariam a implantação de redes duplas de distribuição e coleta, acarretando um elevado custo inicial e tornando essa alternativa inviável (COHIM e KIPERSTOK, 2007). Sendo assim, é economicamente mais viável o tratamento e reúso em locais próximos do ponto de geração, como é o caso proposto.

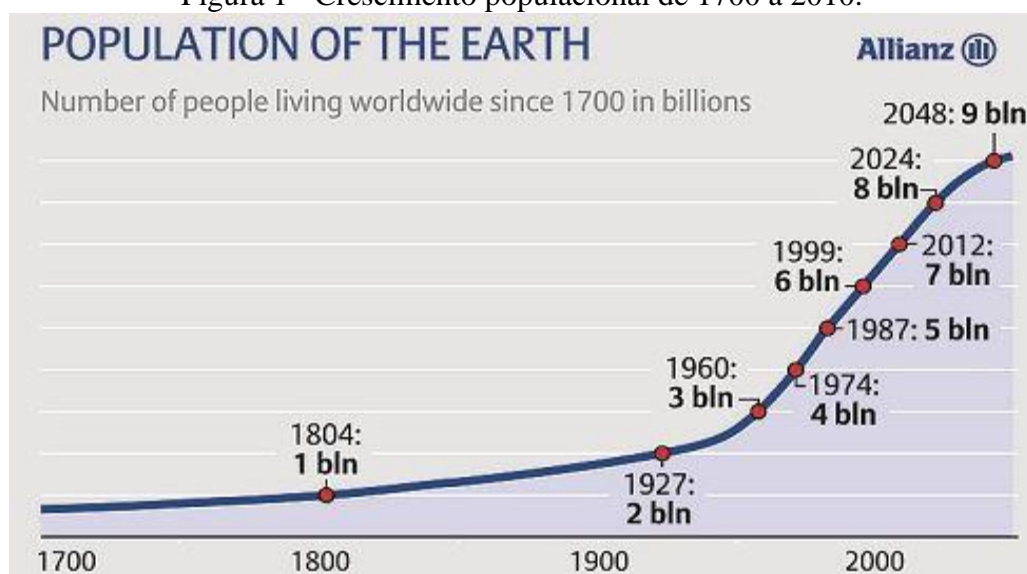
Há inúmeras formas de tratamento para a água cinza, como filtros de areia, membranas de microfiltração e as membranas de ultrafiltração.

O objetivo de estudo deste trabalho é desenvolver um sistema de tratamento para detectar possíveis ocorrências de falhas, utilizando métodos estatísticos em membranas de ultrafiltração.

1.1 Justificativa

Muitos são os motivos que justificam o referido estudo, entre eles destacam-se o crescimento acentuado da população mundial, conforme Figura 1.

Figura 1 - Crescimento populacional de 1700 a 2010.



Fonte: APRENDA.BIO, (2014).

Onde observa-se um crescimento exponencial da população, contrapondo-se aos recursos naturais que são constantes, evidenciando uma crescente demanda por estes recursos e cada vez menos recursos disponíveis, como é o caso da água potável disponível para consumo humano.

Dentre os recursos podemos destacar a água, os alimentos, as propriedades, dentre outros. No contexto deste trabalho levaremos em consideração apenas o uso da água, onde vários autores enfatizam sua importância, dentre eles May (2009) destaca a importância da análise da disponibilidade futura deste recurso indispensável: “A água é essencial à vida no planeta. No entanto, o volume de água potável para consumo torna-se cada vez mais escasso” (MAY, 2009).

Segundo o SindusCon-SP (2005), para restabelecer o equilíbrio entre oferta e demanda de água e garantir a sustentabilidade do desenvolvimento econômico e social, é necessário que métodos e sistemas alternativos modernos sejam convenientemente desenvolvidos e aplicados em função de características de sistemas e centros de produção específicos.

Golçalves (2009) também destaca que os tratamentos residenciais podem ser direcionados à utilização da água gerada em aplicações menos nobres (que não exigem altos padrões de qualidade). Ainda assim teríamos uma redução considerável na utilização de água de mananciais, mantendo o atendimento dos consumidores.

“Em média, 40% do total de água consumida em uma residência são destinados aos usos não potáveis. Desta forma, estabelecendo um modelo de abastecimento de rede dupla de água, sendo uma rede de água potável e outra de água de reúso, a conservação da água através da redução do consumo de água potável, seria garantida” (GONÇALVES, 2009).

Gonçalves (2006) afirma que o uso de fontes alternativas de suprimento para o abastecimento dos pontos de consumo de água não potável é uma importante prática na busca da sustentabilidade hídrica. Dentre as fontes alternativas, pode-se citar o aproveitamento da água da chuva, o reúso de águas servidas e a dessalinização da água do mar.

Analisando do ponto de vista de sistemas automatizados, é notório que os processos automatizados estão cada vez mais presentes no cotidiano das pessoas, agregando valor ao produto final, qualidade e facilitando análise de falhas ou mesmo aumentando o rendimento dos processos, neste contexto, Roberto (1989) destaca:

“... nos últimos anos, os sistemas de controle vêm apresentando um desenvolvimento de tal volume, que se se faz necessário um estudo bastante generalizado a fim de se difundir esta nova tecnologia no país. Já encontramos com muita frequência estes sistemas em diversos setores da indústria, tais como: controle de máquinas operatrizes, linha de montagem automática, controle de qualidade, sistemas militares, sistemas de transporte, robótica e muitos outros.”

Ainda segundo Roberto (1989), a escolha do projeto a ser implantado deve levar em consideração a complexidade do sistema.

Desta forma, assumindo que a configuração ideal de um sistema de tratamento de água deve conter um sistema de automatização que viabilize a aplicação, agregando valor ao produto final e aperfeiçoando os recursos necessários para adequação dos parâmetros normatizados, deve-se levar em consideração que o tempo de retorno é suficientemente pequeno. Segundo FRACCHETTA (2016), o custo com a automatização no tratamento de água pode ser rapidamente compensado pela economia gerada na dosagem dos produtos para adequar os parâmetros legisláveis.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral a implementação de um sistema automatizado aplicado ao tratamento de água cinza em um sistema residencial, visando otimizar a vida útil da membrana, dispositivo este diretamente responsável pela qualidade da água gerada e que é responsável por grande parte do investimento na implantação do sistema.

1.3 Objetivos Específicos

- Estudar a alteração do comportamento da membrana com o aumento da vida útil da mesma;
- Realizar sua análise dos dados históricos para previsão de falha da membrana, visando aumentar a vida útil e a qualidade da água gerada.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

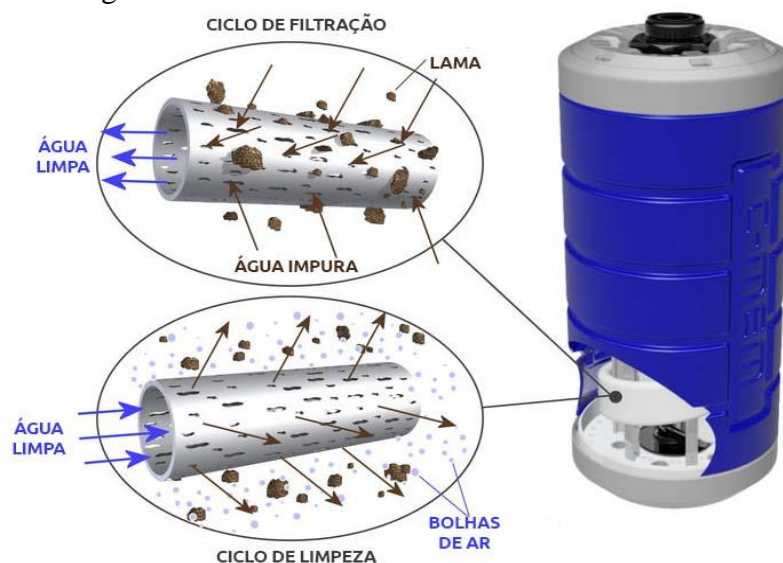
Este capítulo apresenta a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, aprofundando os conhecimentos em assuntos como tratamento de água cinza com membranas de ultrafiltração e o uso de dados históricos para previsão de falhas operacionais.

2.1 Tratamento de água cinza com membranas de ultrafiltração

O uso de membranas para tratamento de águas residuárias é uma tecnologia recente e em ascensão. Seu emprego no tratamento de água cinza é apontado como uma alternativa interessante, uma vez que a corrente hídrica apresenta menores cargas de matéria orgânica, patógenos e, principalmente, de sólidos em suspensão, contribuindo assim para um maior tempo de operação antes da colmatação da membrana (obstrução dos poros). Portanto, é necessário que o sistema de tratamento com membranas seja composto de um sistema robusto, que apresente um controle da pressão transmembrana, acionando um ciclo de retrolavagem quando reduzida à eficácia da filtração, a fim de prevenir um eventual rompimento das fibras internas (NGHEIM; OSCHMANN e SCHAFFER, 2006).

O tratamento da água cinza com membranas de ultrafiltração consiste basicamente no processo de filtração podendo ser seguido por uma etapa de desinfecção. O tratamento com membranas destaca-se dos demais métodos por não necessitar de adição de elementos químicos para filtração (como a dosagem do cloro), eliminação de bactérias, entre outros. Seu processo de filtração basicamente divide-se na operação da água residuária em dois sentidos distintos: no sentido de produção a circulação dar-se no sentido de filtração e em um segundo momento quando há acúmulo de rejeitos sólidos a circulação dar-se no sentido inverso (retrolavagem ou ciclo de limpeza), conforme detalhado na Figura 2.

Figura 2 - Detalhe interno do sistema de tratamento



Fonte: GB-ECOSOLUTIONS, (2016).

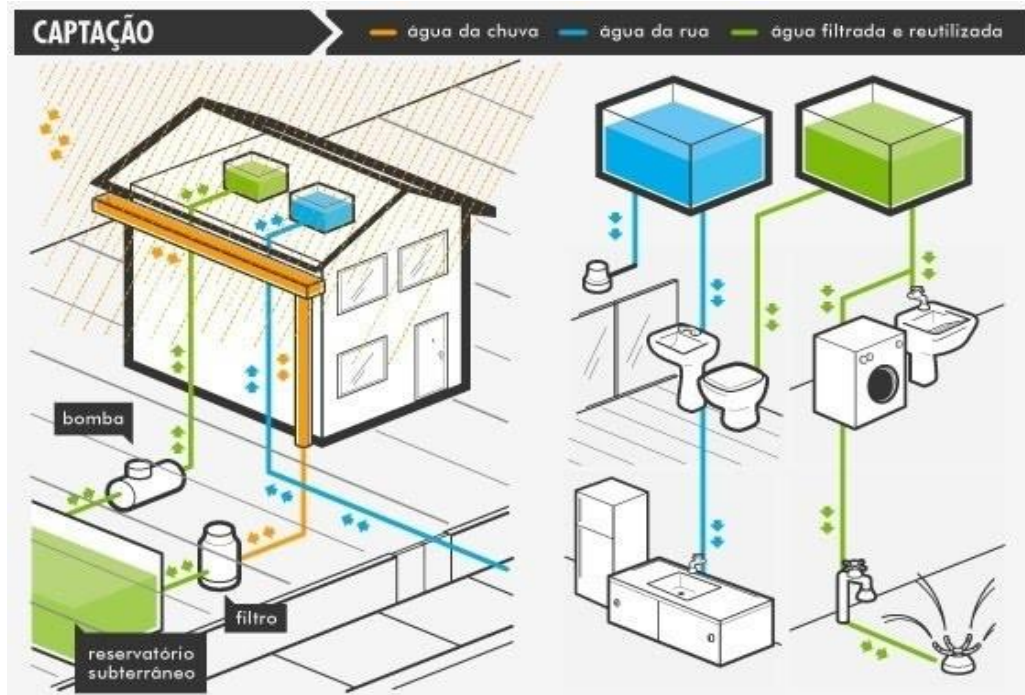
Muitos parâmetros devem ser considerados na escolha da membrana a ser utilizada. Os principais elementos associados ao projeto de sistemas de reúso direto de água cinza são:

- Pontos de coleta de água cinza e pontos de uso;
- Determinação de vazões disponíveis;
- Dimensionamento do sistema de coleta e transporte da água cinza bruta;
- Determinação do volume de água a ser armazenado;
- Estabelecimento dos usos da água cinza tratada;
- Definição dos parâmetros de qualidade da água em função do uso estabelecido;
- Tratamento da água;
- Dimensionamento do sistema de distribuição de água tratada aos pontos de consumo;
- Projeto dos sistemas complementares (filtro, dosador de cloro, bomba, controle da bomba);
- Locação dos elementos do sistema de aproveitamento de água cinza.

Portanto, para o correto dimensionamento de um sistema de tratamento, todos os parâmetros listados anteriormente devem ser considerados. A

Figura 3 demonstra uma possível instalação com o tratamento de água cinza.

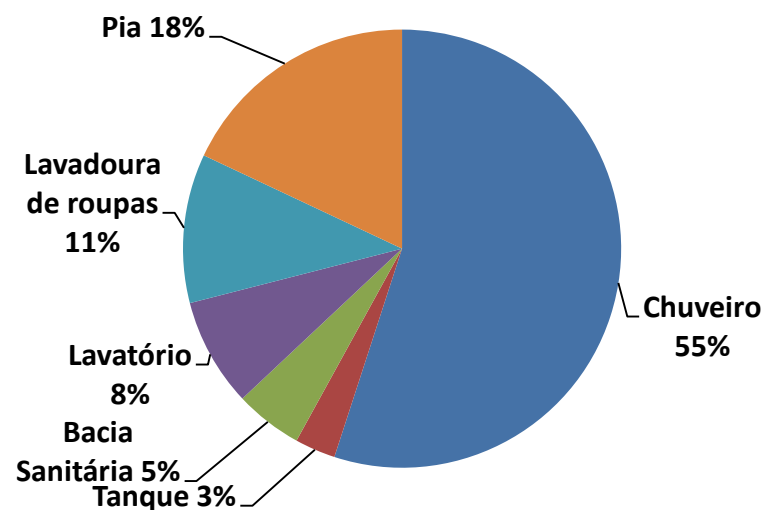
Figura 3 - Sistema de uso de água de chuva no jardim, lavanderia e vaso sanitário.



Fonte: UOL ARQUITETURA, (2010).

Outro dado de suma importância a respeito da distribuição do consumo de água é a utilização deste recurso em cada aplicação, o que direciona qual é o tratamento mais adequado, uma vez que o objetivo principal é minimizar o consumo de água de mananciais. A Figura 4 apresenta uma pesquisa realizada pela USP a respeito da distribuição do consumo de água em unidade residencial unifamiliar.

Figura 4 - Distribuição do consumo de água em unidade residencial unifamiliar.



Fonte: ROCHA et al,(2005).

2.2 Dados históricos para previsão de falhas operacionais

Incrementar a produção, diminuindo o tempo de parada de planta para reparos, e corrigir falhas no processo antes que a qualidade do produto final seja comprometida são questões de fundamental importância e compõem uma nova fronteira para a automação.

Nesse cenário, a segurança e a confiabilidade dos processos são a chave para a competitividade (Murray-Smith e Johansen,1997).

Nas últimas décadas, houve uma notória escalada das tecnologias de instrumentação e a explosão da capacidade de armazenamento dos dispositivos de memória e processamento de sinais.

Isto permitiu que muitas plantas dotadas com centenas ou milhares de sensores, que, além de monitorarem o funcionamento dos processos, também permitem descrever o funcionamento da planta, podendo ser armazenado nos bancos de dados disponíveis para consultas posteriores. Isto abre portas para diversas estratégias de supervisão avançadas, que podem ir do monitoramento do processo à predição de falhas. Neste contexto, surgem as perguntas:

Como utilizar dados do histórico de funcionamento para detectar anomalias?

Como a detecção e o diagnóstico de falhas poderiam impactar na produção?

O que fazer com a detecção de falhas para maximizar a produção?

Falhas possuem um alto custo e grande impacto sobre as atividades, a sua presença na cadeia produtiva diminui o tempo útil de produção, aumenta custos de reparos e representam riscos à saúde dos colaboradores e ao meio ambiente. Em muitos casos, a tomada de uma política de manutenção preventiva é preferível, já que podem ser programadas e diminuem substancialmente a possibilidade de ocorrência de problemas maiores. Porém, com o aumento da produção e a demanda por produtos de qualidade sempre superior, prevenir falhas, tomando como base apenas inferências estatísticas sobre o tempo de vida útil dos elementos, tende a ser dispendioso, dado a crescente complexidade dos equipamentos e,

consequentemente, dos seus custos. Outra forma de ação contra a falha é a abordagem corretiva. Apesar de mais barata à primeira vista, os prejuízos causados pela manutenção a posteriori podem não se justificar, além disso, no atual sistema de produção, não é mais aceitável que os equipamentos ou sistemas parem de modo não planejado. Isto impõe mudanças drásticas nos paradigmas de manutenção, já que as maneiras de gestão anteriormente propostas, diga-se preventiva e corretiva, não colaboram para nenhuma vantagem.

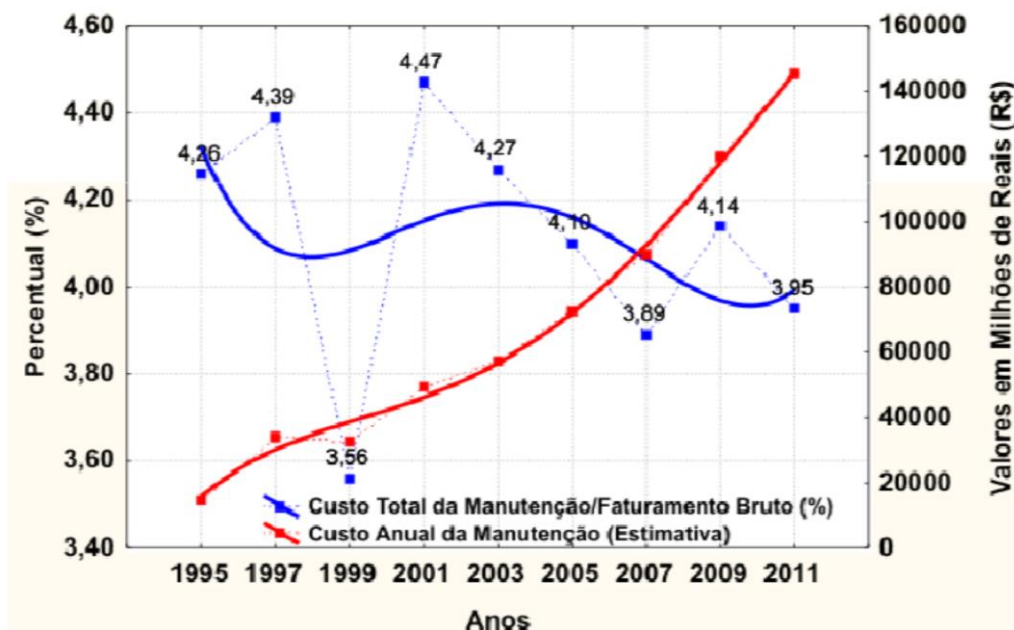
Para alcançar bons níveis de produtividade, é necessário que o processo desenvolva boas taxas de continuidade, requerendo poucas paradas de planta por manutenção ou, o que é o pior dos casos, por ocorrência de falha. Em todo caso, o incremento da margem de lucro deve enfrentar duas pressões antagônicas. De um lado, existe a necessidade de manutenção, a fim de manter a segurança da operação e a operação em si, e do outro, existe a necessidade de maximizar a produção e minimizar os custos e a frequência dos reparos. Isto fica claro em Wireman (2004), quando descreve os custos de manutenção nos Estados Unidos já em 1979, quando alcançaram cerca de 200 bilhões de dólares, com o crescimento esperado de 10% a 15% ao ano. Neste mesmo estudo, é relatado que cerca de um terço do custo total de manutenção foi gasto desnecessariamente por razões como mau planejamento, custos de horas extra, falta de uso dos sistemas de ordem de serviço, entre outros. Conforme definido por Cooke e Paulsen (1997), uma boa estratégia de manutenção acarreta em pouquíssimas ações corretivas e na menor quantidade possível de intervenções preventivas. A produtividade de trabalho, que é um importante indicador da eficiência e se reflete em lucros, pode ser sintetizada como a razão entre o total produzido e horas trabalhadas num período, definido na equação 1:

$$\text{Produtividade} = \frac{\text{total produzido}}{\text{total de horas trabalhadas}} \quad (1)$$

Muitas variáveis podem influenciá-la, porém, em termos gerais, destacam-se os indicadores de disponibilidade e a confiabilidade. Para tornar o sistema mais disponível é preciso que os prazos de parada e o tempo médio para reparo (TMPR) sejam minimizados. A partir de estudos de campo realizados em 2011 pela Associação das Empresas Brasileiras de Manutenção (ABRAMAN) e apresentados no 26º Congresso Brasileiro de Manutenção.

Da Figura 5, observa-se que os custos percentuais de manutenção na indústria seguem uma tendência de queda ano após ano graças à inserção de novas tecnologias e treinamento de pessoal, que auxiliam na gestão de ativos.

Figura 5 - Custo anual de manutenção com base no PIB (milhões de reais).



Fonte: ABRAMAN – 26º Congresso brasileiro de manutenção

Em contraste com esta queda, observa-se na Tabela 1 que a disponibilidade operacional apresenta um padrão de crescimento nos últimos anos, embora não tenha sido provocada pela queda de indisponibilidade devido à manutenção, que se manteve aproximadamente constante. Isto pode indicar que os sistemas, apesar de se tornarem mais robustos contra falhas, ainda carecem de formas de identificação e diagnóstico mais precisos sobre a causa raiz; e os equipamentos, por serem mais complexos, demandam maior tempo para o reparo.

Tabela 1 - Indicadores de disponibilidade dos processos entre 1997 e 2011.

Ano	Indicadores de disponibilidade [%]							
	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011
Disponibilidade operacional	85,82	89,3	91,36	89,48	88,2	90,82	90,27	91,3
Indisponibilidade devido à manutenção	4,74	5,63	5,15	5,82	5,8	5,3	5,43	5,44

Fonte: ABRAMAN – 26º Congresso brasileiro de manutenção

Tradicionalmente, melhorias nas operações foram abordadas através da construção de grandes modelos, que permitiam a otimização e o monitoramento dos processos. No entanto, a síntese destes modelos personalizados para cada planta específica exige muito tempo e esforço, que, muitas vezes, são difíceis de justificar durante a interferência (Kourti. 2002). Entre as propostas destaca-se a análise dos dados de processo por métodos estatísticos multivariados que, em conjunto com o conhecimento dos operadores sobre o processo em questão, pode-se avaliar a saúde da planta e a qualidade do produto final. Essa ferramenta de supervisão não toma o espaço dos profissionais da área, mas, ao contrário, serve como ferramenta para que o monitoramento não dependa somente da sua experiência, do seu treinamento ou da sua atenção. Algumas aplicações bem sucedidas na indústria siderúrgica e química podem ser vistas em Dudzic, Vaculik e Miletic (2000) e Piovoso, Kosanovich e Yuk (1992).

Além das dificuldades de natureza tecnológica, o emprego de muitas destas aplicações depende do entusiasmo com que são recebidas na indústria, em especial por aqueles que as usarão. O estudo de Fuentes et al. (2006) aponta que, apesar dos constantes investimentos na qualificação dos profissionais, níveis maiores de disponibilidade do processo só não são alcançados, porque softwares de processamento de dados tendem a ser muito gerais e levam consigo uma carga muito grande de funções para operações econômicas. Além disto, abordagens muito complexas no campo da matemática exigem uma compreensão mais refinada e esforço para que sejam compreendidas. Por essas razões, muitos supervisórios acabam se tornando menos atraentes e não são contemplados integralmente inviabilizando grande parte das aplicações.

Neste sentido, o desenvolvimento de supervisórios orientados ao usuário final é uma forma interessante de aumentar aceitação destes produtos no mercado.

Uma boa aposta para contornar as questões de aceitação do público alvo poderia ser, por exemplo, a melhoria e expansão de ferramentas as quais os operadores já estejam habituados. Uma análise rápida de aplicações pode revelar que abordagens estatísticas são bastante difundidas para o controle de qualidade e/ou do processo. Dentro deste contexto, fazer uso dos fundamentos estatísticos propiciaria vantagens tanto para resolução dos problemas propostos, quanto para a aceitação dos métodos pela operação.

Controle Estatístico de Processos – SPC

2.2.1.1 História

A história dos métodos de controle estatístico de processos não é nova, alguns dos seus fundamentos foram desenvolvidos no início do século XX. Segundo Kruger e Xie (2012), os princípios de SPC foram introduzidos por Walter A. Shewhart no final de seu emprego no Departamento de Engenharia de Inspeção da Western Electric Company entre 1918 e 1924 e de 1925 até a sua aposentadoria em 1956 nos Laboratórios Bell. Shewhart estendeu seu trabalho, levando a aplicação de controle estatístico para processos de metrologia e reafirmou a importância de métricas básicas estipuladas para ciência, indústria e comércio.

Outro pioneiro neste assunto é Vilfredo Pareto. O qual postulou que muitas falhas em sistemas são resultados de poucas causas. Essas contribuições resultaram em duas vertentes diferentes de análise, enquanto o trabalho de Shewhart pode ser visto como a “observação de um sistema”, o trabalho de Pareto serve como uma análise de causa raiz, se o sistema opera de forma anormal. Assim, o aspecto de controle desta metodologia atribuído à Lei de Pareto indica que a melhoria do processo requer profissionais qualificados que encontrem e tratem os principais problemas, cuja presença é acusada através da observação do sistema, tal como abordado por Shewhart. A partir de 1934 as estratégias de controle apresentadas pelo trabalho de Shewhart encontraram grande sucesso na indústria através de W. Edwards Deming e Raymong T. Birge, que as aplicaram na indústria bélica americana durante a segunda guerra mundial, resultando no aumento de produtividade das fábricas de munições. No pós-guerra, o estudo dos princípios de controle estatístico de processos perdeu força nos Estados Unidos, sendo introduzido no Japão por Deming em meados de 1950. Deming ensinou estes conceitos a engenheiros, gerentes e estudantes. A qualidade e a confiabilidade dos produtos japoneses são atribuídas em grande parte graças à transferência criteriosa dos princípios de controle estatístico e a introdução dos métodos de Taguchi, apresentadas por Genichi Taguchi, em todos os níveis de produção, incluindo na gestão. Mais tarde, o SPC foi incorporado como a pedra angular em um contexto mais amplo originado na década de 80 e conhecido como Gestão da Qualidade Total.

Em 1901, Karl Pearson descreveu a análise de componentes principais em Peason (1901). Entretanto, o procedimento geral conhecido e aplicado atualmente tem suas raízes no trabalho pioneiro de (Hotelling, 1933). A área foi bastante estudada durante as décadas de 30 e 40, enquanto a aplicação das ferramentas ficou limitada ao desenvolvimento dos computadores modernos (Jackson, 2005).

Hoje, graças aos dispositivos de processamento e memória com taxa de transmissão de dados e armazenamento cada vez maiores, as aplicações destas técnicas tornam-se novamente promissoras e factíveis.

Segundo Vicente Falconi, um dos pioneiros no emprego da Gestão da Qualidade Total no Brasil (Campos, 2009) o futuro da análise de dados de hoje é a linha adotada pela Toyota adoção de banco de dados estruturados que possam ser usados para a coleta de dados históricos que permitam a solução rápida da maioria dos problemas da empresa pela utilização da análise multivariada (Hino, 2005). Dessa forma, quando é possível utilizar os bancos de dados com recursos de Análise Multivariada da estatística, a solução dos problemas fica quase automatizada

2.2.1.2 Ferramentas de SPC

Da perspectiva de eficiência de produção, não é prático inspecionar a qualidade através do produto finalizado, tendo em vista que os produtos devem ser produzidos corretamente de uma só vez. A vantagem de utilizar técnicas de controle de processo é justamente esta, ao invés de observar a consequência sobre os produtos gerados, as fontes de variabilidade podem ser identificadas e corrigidas. Algumas ferramentas de controle estatístico de processos podem ser listadas abaixo. Muitas delas encontram grande aplicabilidade na indústria, não sendo escopo deste trabalho a descrição detalhada de cada vertente, com exceção das cartas de controle.

- Histograma;
- Diagrama de Pareto;
- Diagrama Causa-efeito;
- Diagrama de concentração de defeito;
- Cartas de controle;
- Diagrama de pontos;

- Planilha de verificação.

É importante ter em mente que, apesar de objetivar a redução total da variabilidade do sistema, as técnicas de controle estatístico não são capazes de reduzi-la a zero. A variabilidade é inerente aos sistemas, podendo somente ser reduzida, o que é alcançado pela aplicação sistemática das ferramentas de controle. Segundo Montgomery e Runger (2010), a carta de controle é a ferramenta mais poderosa entre aquelas que compõem as técnicas de SPC e a sua grande popularidade é justificada por cinco motivos:

- É comprovado que cartas de controle aumentam produtividade: perdas de tempo e matéria prima com retrabalho são causas primárias de redução de produtividade. Uma vez reduzidas, a produtividade aumenta, os custos caem e a capacidade produtiva é ampliada;
- Cartas de controle são eficientes para prevenir defeitos: as cartas de controle são otimizadas para manter o processo em controle, o que é consistente com a filosofia de “fazer certo de uma só vez”. Se o processo produz mercadoria de qualidade desejada agora, é determinístico dizer que, caso se mantenha estável, continuará produzindo produtos idênticos;
- Previnem ajustes desnecessários no processo: tendo em vista que as cartas conseguem distinguir entre a variabilidade inerente do sistema e aquela decorrente de um evento especial, a ação dos operadores pode ser direcionada para o reajuste do sistema sempre que haja necessidade. Da mesma forma, pode evitar que ajustes desnecessários degradem o desempenho;
- Proveem informação de diagnóstico: geralmente, padrões das variáveis na carta de controle contêm informação preciosa para operadores experientes, o que o permite implementar a mudança no processo e melhorar a performance;
- Informam sobre a capacidade do processo: proveem informações sobre o valor de importantes valores do processo e sua estabilidade ao longo do tempo. Assim, permite prever a capacidade do sistema com base empírica, o que auxilia nos projetos de produtos e processos.

Análise Estatística Univariada

Enquanto produtos são continuamente produzidos em um processo e atividades são monitoradas, dados devem ser coletados para avaliar a estabilidade e a capacidade do processo em questão. Assim, se o processo é estacionário, um desvio deve ser provocado somente por variações de causa comum. Apesar de originalmente pensada para o controle de qualidade, a análise estatística pode ser estendida ao monitoramento do processo através das técnicas de controle estatístico de processo (SPC). Isso é válido se as questões ligadas à natureza estocástica das variáveis observadas são respeitadas. Em todo caso, se a variação dos dados se resume à de causa comum, a distribuição das amostras deve seguir um modelo gaussiano com média μ e desvio padrão σ , isto é $X \sim N(\mu, \sigma)$ descrito pela equação 2, que retrata a função de densidade de probabilidade gaussiana. De uma forma geral, mesmo que a distribuição das amostras não sigam uma curva gaussiana, o teorema do limite central permite dizer que, para um conjunto de amostras suficientemente grande, a média e o desvio padrão das médias amostrais convergem para a média e o desvio padrão populacionais (Hogg, 1970), o que acentua a importância e o poder de generalização deste modelo.

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (2)$$

Para o caso em que as propriedades da distribuição populacional fossem conhecidas, os intervalos de confiança poderiam ser calculados diretamente em termos do desvio padrão, segundo uma distância normalizada em função do desvio padrão. Assim, pode-se definir a distância estatística univariada z como:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

A integral da função de densidade de probabilidade na Equação 4 retorna a probabilidade de ocorrência de observações em diferentes faixas de possíveis valores assumidos.

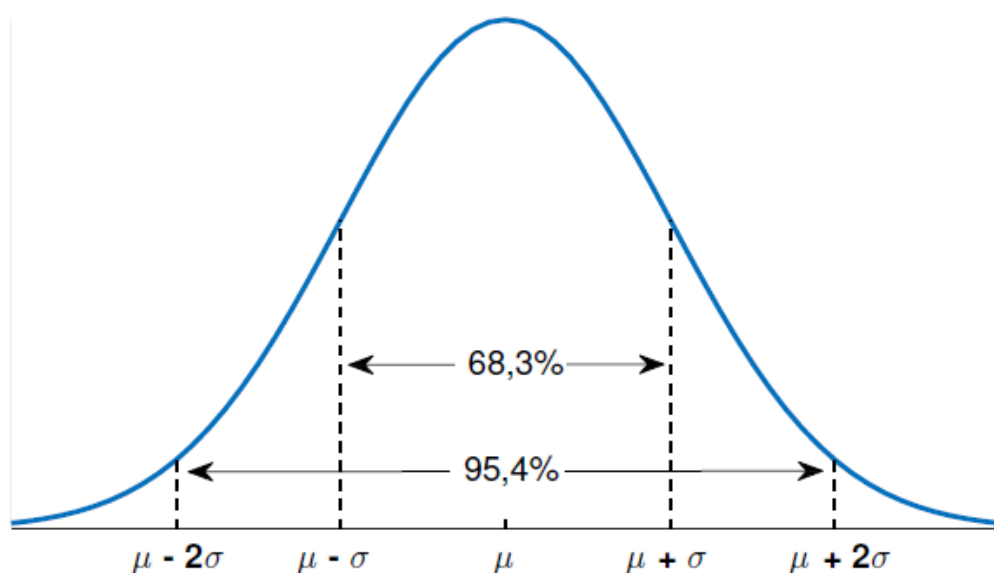
Intuitivamente, é possível notar que, quanto mais distantes da média μ , mais raro se tornam as realizações e, de modo análogo, quanto mais perto, mais comuns se tornam. É

possível definir limiares em torno da média para identificar a presença de ocorrências não comuns a partir de um nível de significância α . Isto quer dizer que a região compreendida pelos limiares devem englobar $100(1 - \alpha)\%$ das realizações, permitindo que amostras que se projetassem fora da região sejam estudadas. Muitas vezes, as bordas são definidas em termos do desvio padrão e definem alguns valores notáveis para α .

$$\text{Para } \alpha = 31,7\% : \int_{\mu - \sigma}^{\mu + \sigma} f(x)dx = P\{\mu - \sigma < x < \mu + \sigma\} = 100\{1 - 0,317\} = 68,3\% \quad (4)$$

$$\text{Para } \alpha = 4,6\% : \int_{\mu - 2\sigma}^{\mu + 2\sigma} f(x)dx = P\{\mu - 2\sigma < x < \mu + 2\sigma\} = 100\{1 - 0,046\} = 95,4\% \quad (5)$$

Figura 6- Função de distribuição de probabilidade gaussiana univariada.



Fonte: Grobberio (2016).

Assim, testes de hipótese estatísticos podem ser utilizados para inferir sobre a normalidade da variável analisada. De uma forma genérica, os testes assumem duas hipóteses que comparam as amostras coletadas com a distribuição conhecida descrita pelo comportamento normal. Qualquer desvio em relação aos parâmetros normais podem, então, ser identificados. A hipótese nula H_0 verifica se a média amostral corresponde à média populacional para o nível de significância α . Assim:

$$H_0: \mu = x$$

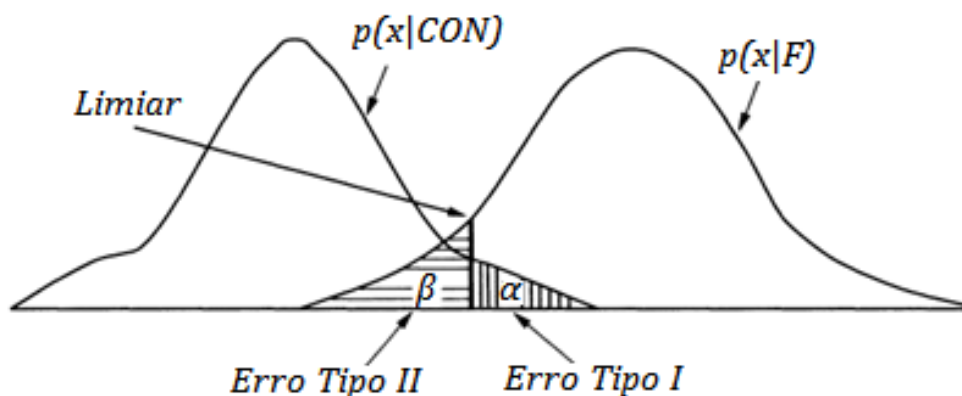
A hipótese alternativa H_1 , por sua vez, é assumida caso a hipótese nula não seja validada, o que significa que:

$$H_1: \mu \neq x$$

Tanto para o controle de qualidade quanto para o controle de processos, a hipótese alternativa H_1 traduz a ocorrência de eventos anormais. É importante observar que, estatisticamente, valores superiores aos limiares são previstos para a variável monitorada mesmo em casos normais. De toda forma, estas amostras podem conter informações importantes e merecem ser investigadas.

Existe uma importante relação de compromisso que envolve a escolha dos níveis de significância. Assuma que CON represente a situação de normalidade e F represente um evento anormal para uma variável x qualquer. A hipótese nula H_0 traduz $x \in \text{CON}$ enquanto a hipótese alternativa H_1 indica que $x \in \text{F}$. A Figura 7 ilustra o caso em que alguma ocorrência anormal provoca uma alteração no valor da média populacional, transformando a função de densidade de probabilidade $p(x|\text{CON})$ em $p(x|\text{F})$. É possível ver que a intersecção das curvas é delimitada por um limiar, resultando em duas diferentes áreas representadas por α e outra por β . Neste caso, amostras menores (à esquerda) que o limiar serão consideradas como evento normal (CON), enquanto aquelas superiores (à direita) como evento anormal (F). Note que para intervalos de confiança muito largos há a diminuição da taxa de falsos alarmes definida por α , ao passo que torna o sistema menos sensível às falhas com o crescimento de β . O oposto é da mesma forma válido, diminuindo a região de confiabilidade (α maior), o sistema identifica qualquer variação decorrente da falha (β menor), com o custo de aumentar significativamente a taxa de falsos alarmes. Uma regra geral é que α muito pequeno implica em insensibilidade a variações, enquanto α muito grande implica em altas taxas de falsos alarmes. Na prática, é necessário que o limiar escolhido seja capaz de identificar a ocorrência de eventos anormais, mas que, sobretudo, não ocasione altas taxas de falsos alarmes. Isto poderia levar o supervisor ao descrédito no qual o Erro do Tipo I significa o falso positivo, isto é, a acusação de falha em uma situação de normalidade e o Erro do Tipo II significa o falso negativo, isto é, a acusação de normalidade de uma situação de anômala.

Figura 7- Representação gráfica dos erros do tipo 1 e do tipo 2.



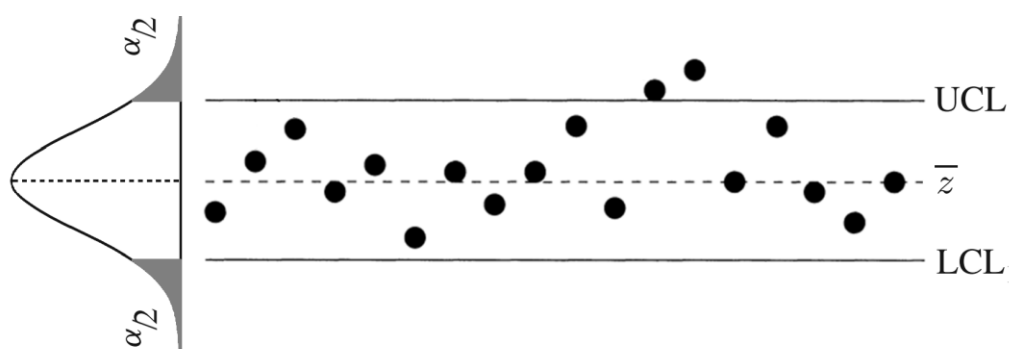
Fonte: Chiang, Braatz e Russell (2001). Figura adaptada.

Conforme visto, a verificação das hipóteses requer o conhecimento das propriedades populacionais, o que é uma limitação em aplicações reais, já que estes valores não são conhecidos na maioria das vezes. A inferência, nestes casos, representa uma importante parte de qualquer análise estatística, pois a obtenção de informações sobre uma população com base em amostras é fundamental para as conclusões assumidas.

Carta de Controle Univariado

Uma ferramenta muito utilizada ainda hoje é a carta de controle (ou carta de Shewhart em homenagem ao seu criador) ilustrada na Figura 8. De uma forma geral, a proposta de qualquer carta de controle é a identificação da ocorrência de variações de causa especial.

Figura 8 - Carta univariada de Shewhart.



Fonte: Chiang, Braatz e Russell (2001). Figura adaptada.

Esta carta simplifica o teste de hipóteses apresentado anteriormente para uma análise gráfica. Nesta análise, os dados são plotados em função do tempo e são limitados por duas linhas horizontais, chamadas limites de controle ou de confiabilidade, que representam o total de variabilidade admitido para a causa comum. Em situações normais, os dados devem permanecer dentro da região delimitada pelas retas. Eventualmente, algumas amostras podem ultrapassar os limites de controle, o que é estatisticamente permitido e modelado pelo nível de significância α . Para os casos em que os parâmetros populacionais não sejam conhecidos, a média e o desvio padrão amostrais de dados em controle podem ser usados para modelar os limites de confiabilidade.

É importante mencionar que a identificação de anormalidades nos dados através da carta de controle não se limita à observação da fuga das amostras da região de confiabilidade.

O conjunto de regras definido em Electric (1956) define uma série de verificações para diagnosticar padrões não randômicos nos dados analisados.

- Um ponto excede o limite de controle definido por 3σ ;
- Dois ou três pontos consecutivos acima do limite definido por 2σ ;
- Quatro ou cinco pontos consecutivos acima do limite definido por σ ;
- Oito pontos consecutivos de um lado da linha central.

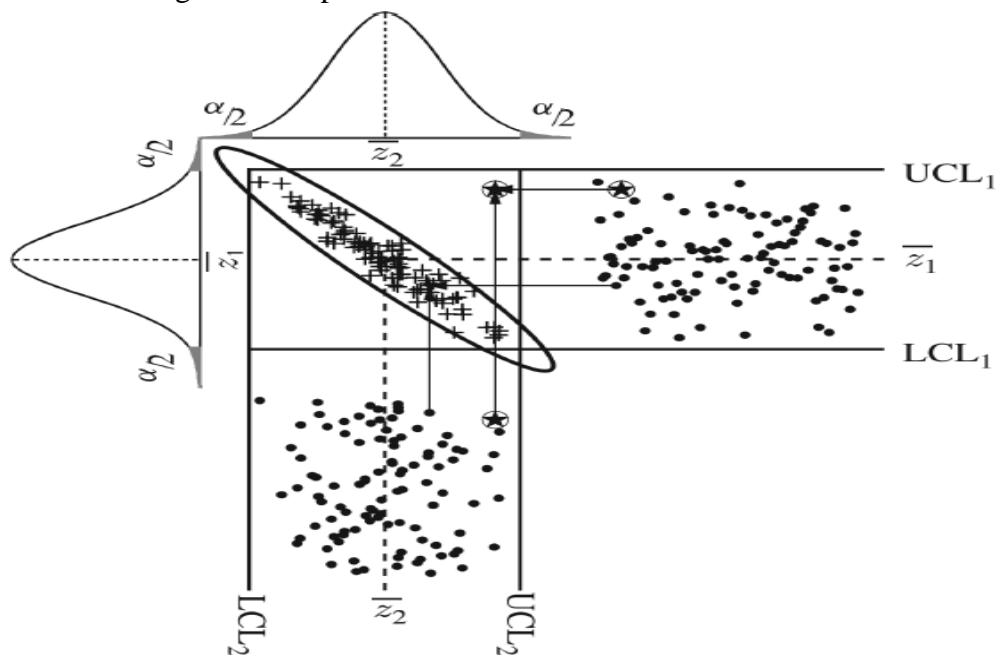
De uma forma grosseira, os produtos responsáveis pelo alarme poderiam ser recolhidos, pela consideração de não cumprimento dos requisitos mínimos de qualidade.

Análise Estatística Multivariada

Apesar da aparente robustez da análise univariada, existe uma questão que merece atenção durante a utilização desta metodologia. Variáveis poucas vezes são descorrelacionadas uma das outras, o que torna um pouco arriscado acreditar que uma propriedade por si só poderá descrever completamente a normalidade. Apesar disso, muitas indústrias ainda utilizam as Cartas de Shewhart para monitorar os produtos e as variáveis-chave do processo (Kourti, 2002).

Tendo em vista o estado de instrumentação das plantas atuais, observar somente as propriedades do produto final pode ser algo inapropriado. Análises de qualidade como massa molecular de polímeros, características de fusão, entre outras, produzem menos informações em intervalos de tempo muito mais espaçados, sendo coletadas, em grande parte, já no final do processo através de testes laboratoriais. Esta estratégia pode não assegurar vantagens competitivas às indústrias, já que ações corretivas não podem ser tomadas a tempo de solucionar as causas das variabilidades indesejadas, aumentando o desperdício. Por outro lado, o sensoriamento das plantas gera enormes blocos de informação a cada instante de amostragem em diversos estágios da produção, que seriam perdidos caso não fossem levados em consideração por algum sistema de supervisão. Nestas situações, a correlação entre os dados é agravada devido ao encadeamento dos processos, aos sistemas realimentados e à interdependência das malhas de controle. Os efeitos da variação conjunta dos dados sobre as técnicas de controle estatístico univariado devem ser levados em conta para que as regiões de confiança sejam corretamente descritas. Supondo duas variáveis z_1 e z_2 que seguem uma distribuição normal e estão correlacionadas, a Figura 9 apresenta a região no plano $z_1 - z_2$ descrita pelas variáveis durante a operação em normalidade. As cartas de controle univariadas são apresentadas na horizontal para z_1 e na vertical para z_2 , fazendo com que a projeção dos intervalos de confiança univariados $[UCL_1, LCL_1]$ e $[UCL_2, LCL_2]$ produza um retângulo no plano.

Figura 9 - Elipse de controle da estatística multivariada.



Fonte: Kruger e Xie (2012). Figura adaptada.

Na situação apresentada, as análises univariada de ambas variáveis indicam que z_1 e z_2 estão sob normalidade, já que para todas as amostras os limites definidos foram respeitados. Entretanto, é possível observar que os dados não se organizam preenchendo uniformemente a região retangular. Devido à correlação entre as variáveis, a região definida se assemelha a uma elipse. Para as situações limite, onde existe total correlação entre os dados e onde há independência entre as variáveis, os dados formariam uma reta e um círculo, respectivamente.

Para a verificação da normalidade, o monitoramento multivariado acusaria corretamente que a amostra identificada por ★ representa uma possível divergência do padrão de normalidade, que é ilustrado pelo afastamento da amostra da nuvem de pontos. Assim, tendo em vista que o contorno definido pela elipse produz um classificador mais refinado, a análise multivariada seria mais sensível à presença de anomalias para o mesmo nível de significância considerada nas análises univariada.

A função gaussiana definida anteriormente para o caso univariado pode ser estendida na forma da equação 6 para descrever a distribuição conjunta de múltiplas variáveis, que se distribuam normalmente. Neste caso, qualquer que seja a dimensão do espaço analisado, isto é, a quantidade m de variáveis observadas, a função gaussiana multivariada descreverá um elipsoide no hiperplano.

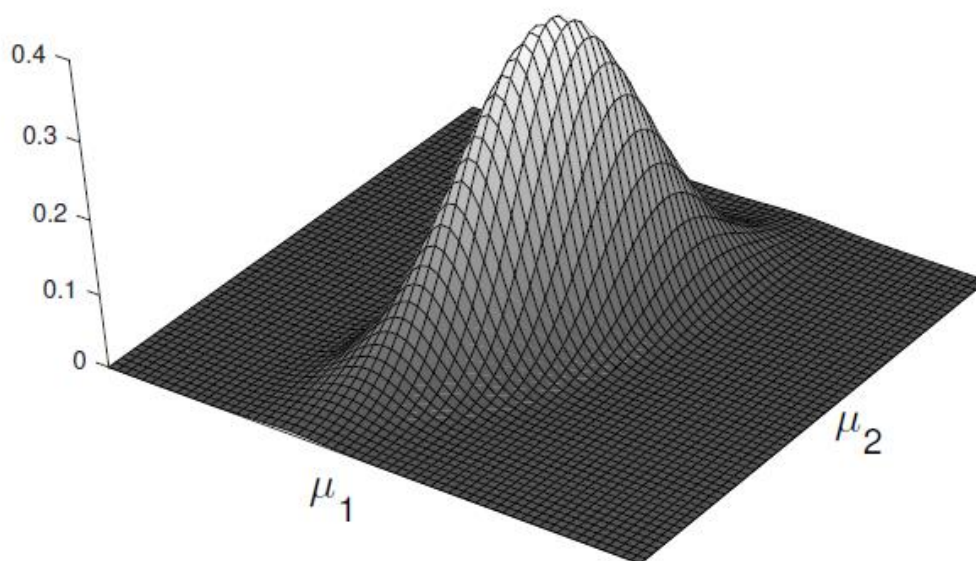
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi^m |\Sigma|}} \exp\left(-\frac{1}{2} (x - \mu)\Sigma^{-1}(x - \mu)\right) \quad (6)$$

Onde μ é a média populacional de dimensão $1 \times m$ e Σ é a matriz de covariância das variáveis de dimensão $m \times m$. Para o caso bidimensional, a forma assumida pela distribuição é ilustrada pela Figura 10, usando:

$$\mu = (2,2)$$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} 0,9 & 0,4 \\ 0,4 & 0,3 \end{pmatrix}$$

Figura 10 - Função de densidade de probabilidade gaussiana multivariada.



Fonte: Grobberio (2016).

A notação da distância estatística univariada definida anteriormente na equação 6 pode ser estendida para o caso m-dimensional. Assumindo que a matriz simétrica Σ é positiva definida, a generalização da distância estatística pode ser sintetizada por:

$$d = (x - \mu)\Sigma^{-1}(x - \mu)^T \quad (7)$$

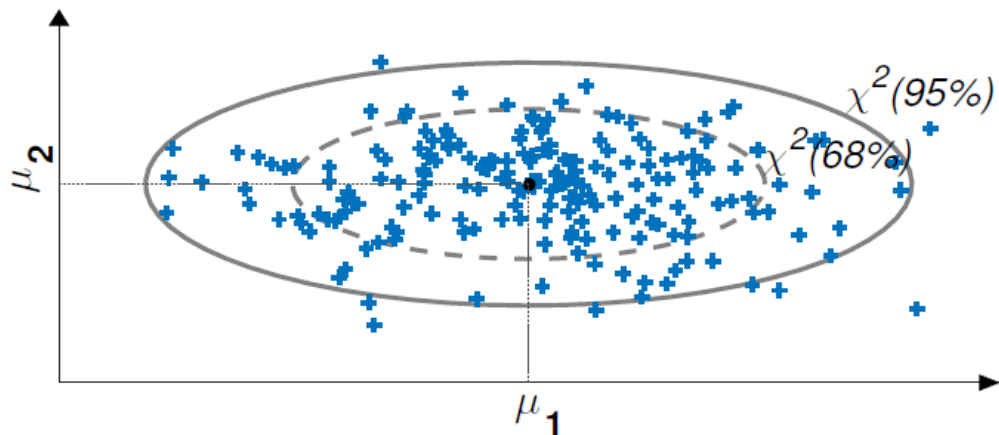
Pela análise da equação 7 é possível observar que as curvas de contorno dos elipsoides definem contornos equiprováveis, isto é, a densidade de probabilidade é igual para toda amostra $x \ 1 \times m$ no contorno C. Isto fica claro quando o caso bidimensional para duas variáveis descorrelacionadas $\sigma_{12} = \sigma_{21} = 0$ é considerado. Para um contorno C qualquer, é trivial verificar que o seu formato acompanha uma elipse, conforme pode ser verificado a seguir.

$$(x - \mu)\Sigma^{-1}(x - \mu)^T = c^2 \quad (8)$$

$$[x_1 - \mu_1, x_2 - \mu_2] \begin{pmatrix} 0,9 & 0,4 \\ 0,4 & 0,3 \end{pmatrix} [x_1 - \mu_1, x_2 - \mu_2]^T = c^2 \quad (9)$$

$$\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{c^2\sigma_1^2} + \frac{(x_2 - \mu_2)^2}{c^2\sigma_2^2} = 1 \quad (10)$$

Figura 11 - Elipses de controle para significância de 68% e 95%.



Fonte: Grobberio (2016).

Seja ϕ uma variável aleatória definida por

$$\phi = \sum_{i=1}^m Z_i^2 = \sum_{i=1}^m \left(\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (11)$$

Para Z_i independentes, ϕ deverá seguir uma distribuição Qui-quadrada, isto é, $\phi \sim X_m^2$ para m graus de liberdade. Segundo Johnson, Wichern et al. (2002), para qualquer que seja o nível de correlação entre as variáveis, o contorno C pode ser escolhido de forma que traduza a significância estatística representada pela distribuição Qui-quadrada $X_m^2(\alpha)$, onde $X_m^2(\alpha)$, é o limite superior para exclusão de $100\alpha\%$ das amostras para uma distribuição com m graus de liberdade. Dessa forma, é possível definir um contorno que contenha $100(1 - \alpha)\%$ das amostras, que pode ser usado de forma similar a análise univariada para a definição de um limiar de confiança.

$$(x - \mu)\Sigma^{-1}(x - \mu)^T < c^2 = X_m^2(\alpha) \quad (13)$$

No contexto da análise multivariada, surgem demandas de diferentes campos. De um lado, existe a demanda de refinamento dos modelos e da exploração dos potenciais ganhos oferecidos pela análise das variáveis de processo, onde a baixa relação sinal-ruído dos sinais, a alta correlação e a natureza não-causal devem ser levadas em consideração. Do outro lado, existe a demanda da utilização, que objetiva um sistema de monitoramento simples de usar, de apresentar e de interpretar, tais como as cartas univariada. A dificuldade com a exposição

dos resultados é potencializada quando as variáveis descrevem espaços com centenas de dimensões, tornando impossível o monitoramento visual dos dados conforme apresentado no caso bivariável. Entretanto, visto que um limiar de confiança estatístico pode ser definido e a distância retorna um valor real para qualquer que seja a dimensão m , cartas de controle multivariada podem ser analisadas da mesma forma que as univariada, permitindo que as demandas de utilização sejam atendidas sem grandes problemas.

Diversas extensões para as análises multivariadas são encontradas na literatura e apresentam soluções para questões como a redução espacial do espaço original e a inferência estatística quando as propriedades populacionais sejam definidas por informação amostral. A Análise de Componentes Principais (PCA) combinada a abordagens de estatística multivariada como a estatística T^2 de Hotelling e residual (Q) são frequentemente encontradas em aplicações reais, pois auxiliam no incremento da robustez dos descritores estatísticos.

2.2.5 Estatística T^2 de Hotelling

A estatística T^2 de Hotelling é uma generalização do teste-t que se estende para o caso multidimensional. De forma equivalente ao caso univariado, a consideração prévia sobre a distribuição gaussiana das amostras é necessária.

Em termos de engenharia, o objetivo desta estatística é identificar a presença de anormalidades em amostras futuras a partir de dados coletados do processo em operação estável. Se estas variáveis de processo são estacionárias e independentemente distribuídas, isto é, não há autocorrelação, a distribuição conjunta pode ser vista como $N_m(\mu, \Sigma)$.

Entretanto, muitas vezes Σ não é conhecido, forçando que a inferência da covariância S e a média amostral \bar{X} sejam utilizadas. Segundo Johnson, Wichern et al. (2002), se $X_1, X_2 \dots X_n$ compõem uma região de operação normal, a análise estatística para uma observação futura X é:

$$T^2 = (X - \bar{X})S^{-1}(X - \bar{X})^T \quad (12)$$

Assim como no caso da distância estatística, para a análise da estatística T^2 um limiar de confiabilidade pode ser definido. Porém, é importante notar que o uso da distribuição qui-quadrada para a definição do limiar requer que a matriz de covariância real das variáveis seja conhecida, mas que, muitas vezes, é estimada pelos dados amostrais. Segundo menção em Kruger e Xie (2012) e discutido em detalhes em Anderson (2003), a equação 12 descreveria uma distribuição F caso a variância-covariância populacional não fosse conhecida. Assim, o valor do limiar de confiança para a estatística T^2 , conforme definido em MacGregor e Kourti (1995), fica:

$$T^2_{\alpha} = \frac{(n^2 - 1)m}{n(n - m)} F_{m, n-m} \quad (13)$$

onde $F_{m, n-m}$ é uma distribuição F com m e $n-m$ graus de liberdade. É natural supor que o aumento do número de amostras utilizadas para a estimação dos parâmetros reais torna a covariância estimada mais próxima da populacional. Assim, para $n \rightarrow \infty$, converge para uma distribuição Qui-quadrada.

$$(X - \bar{X}).S^{-1}.(X - \bar{X})^T \leq T^2_{\alpha} = \frac{(n^2 - 1)m}{n(n - m)} F_{m, n-m} \quad (14)$$

Para a hipótese nula $H_0: T^2 \leq T^2_{\alpha}$, o que indica que os dados coletados estão dentro do elipsoide definido como modelo de normalidade. Por sua vez, a hipótese alternativa H_{01} será aceita sempre que esse T^2 exceder o valor limite definido pela estatística, indicando que as amostras fugiram do padrão de normalidade.

3 APLICAÇÃO

A abordagem apresentada se baseia na utilização de informações de especialistas para montagem do sistema de tratamento e para seleção das variáveis mais relevantes a serem mensuradas continuamente, na utilização da carta Shewhart univariável e multivariável e na estatística multivariada T2 de Hotelling para a detecção de falhas.

A metodologia apresentada pode ser sintetizada por três etapas fundamentais: montagem, automatização e análise dos dados históricos do sistema de tratamento para detecção de falhas. A estrutura desenvolvida permite o monitoramento contínuo do sistema, o registro dos dados de operação e a antecipação das falhas do sistema viabilizando que a manutenção seja programada de forma preventiva, minimizando os custos de operação e mantendo o sistema com utilização maximizada.

3.1 Introdução

Para realizar a automatização e o monitoramento proposto, utilizou-se o CLP Clic02 da WEG e o supervisor E3 da Elipse. A comunicação entre o CLP e o sistema supervisor ocorre via rede MODBUS- RTU, no qual um pacote de dados é enviado do CLP para supervisor e vice-versa, as vantagens da utilização do CLP está na sua consolidada robustez, disponibilidade de suporte, facilidade de implementação (linguagem Ladder), *software* de programação, simulação gratuitos, disponibilidade de reposição e baixo custo de aquisição.

O supervisor utilizado E3 da Elipse, destacou-se frente aos demais supervisórios pelo seu custo de aquisição e desconto oferecido como incentivo a pesquisa, apresentando como vantagens adicionais :

- Suporte do fornecedor;
- Compatibilidade com sistema *Windows*;
- Grande disponibilidade de apostila para os vários níveis de programador;
- Vídeo aulas gratuitas no canal da Elipse;
- Treinamentos gratuitos online e pela grande gama de pacotes adicionais, como: pacote estatístico, entre outros.

O presente projeto foi dividido em três etapas fundamentais, sendo a primeira etapa foi responsável pela montagem do sistema de tratamento de água cinza. A segunda pela implementação do sistema de automatização e a terceira pela realização das análises dos dados históricos de operação para a detecção de falhas.

3.2 Descrição do sistema de tratamento implementado
















O sistema é composto por uma membrana externa que funciona similarmente a um filtro de água potável residencial, retendo as partículas sólidas e as bactérias. Para o correto funcionamento do sistema e monitoramento dos parâmetros, os especialistas da engenharia ambiental (orientados pelo Doutor Ricardo Francis, UFES) determinaram quais variáveis deveriam ser medidas, para propiciar a análise necessária na obtenção do modelo do sistema de tratamento.

As variáveis monitoradas são:

- Temperatura do reservatório de água a ser filtrada;
- Pressão transmembrana;
- Vazão de água cinza gerada (permeado).

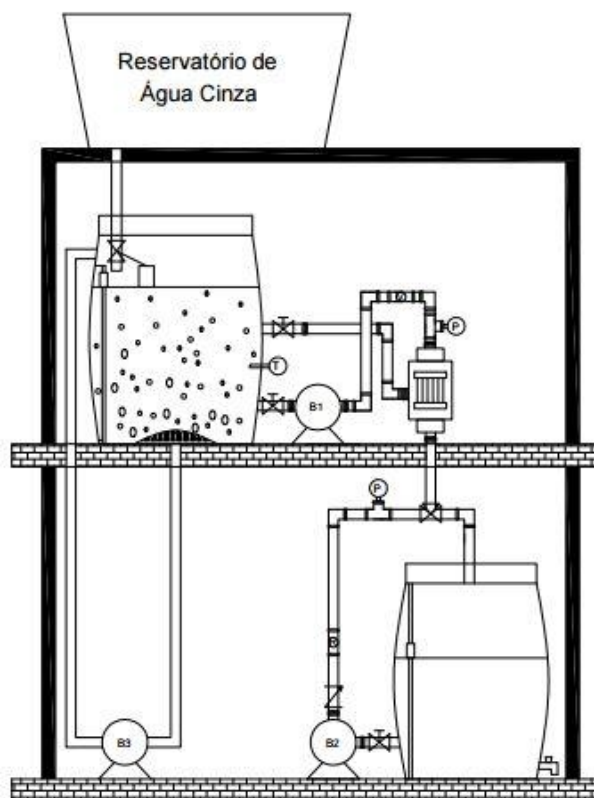
A Figura 13 mostra o P&ID do sistema montado, onde se destacam o reservatório de água para filtração, as bombas que controlaram a vazão de permeado e consecutivamente a produção de água de reúso, assim como os transmissores de vazão, temperatura e pressão que realizaram as medidas para monitoramento e detecção de falhas (conforme especificado na Figura 12).

Figura 12 - Componentes do sistema de tratamento.

Legenda							
	Conexão tipo T		Válvula tipo bóia		Rotâmetro		Bomba
	Conexão 90°		Válvula solenóide 2/3 vias		Sensor de nível tipo mergulhador		Torneira
	União		Sensor de temperatura				
	Válvula de retenção		Sensor de pressão		Membrana		
	Válvula manual 2 vias		Sensor de vazão				

Fonte: Próprio autor.

Figura 13 - Sistema de tratamento de água cinza.

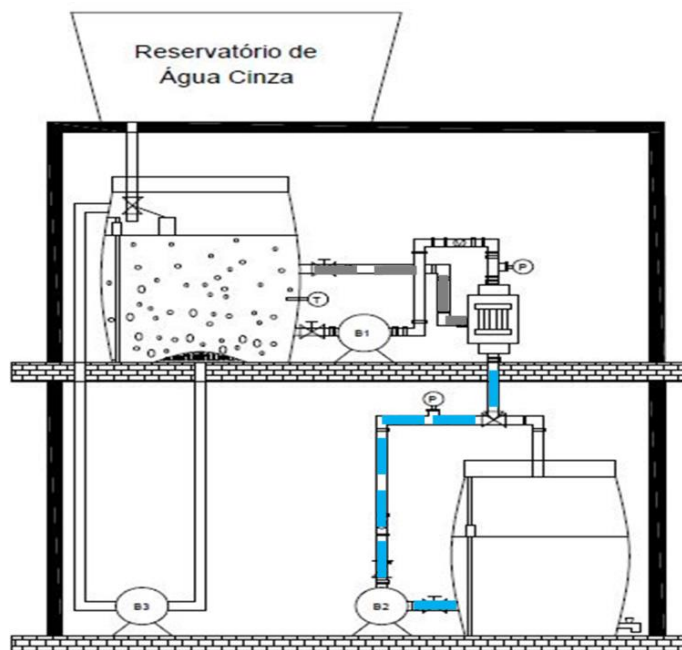


Fonte: Próprio autor.

Um reservatório de água cinza abastece o biorreator, onde uma válvula solenóide de 2 vias, normalmente fechada (NF), controla o fluxo de água que abastece o reservatório inferior, mantendo seu nível entre o limite inferior e superior.

O sistema possui dois modos distintos de operação, modo de operação normal, onde o fluxo de produção de água é bombeado pela bomba B1 do reservatório superior para o reservatório inferior passando pela membrana, neste processo as partículas sólidas são filtradas, acumulando-se na parede interna da membrana levando-a a sua saturação. A Figura 14 apresenta a referida operação.

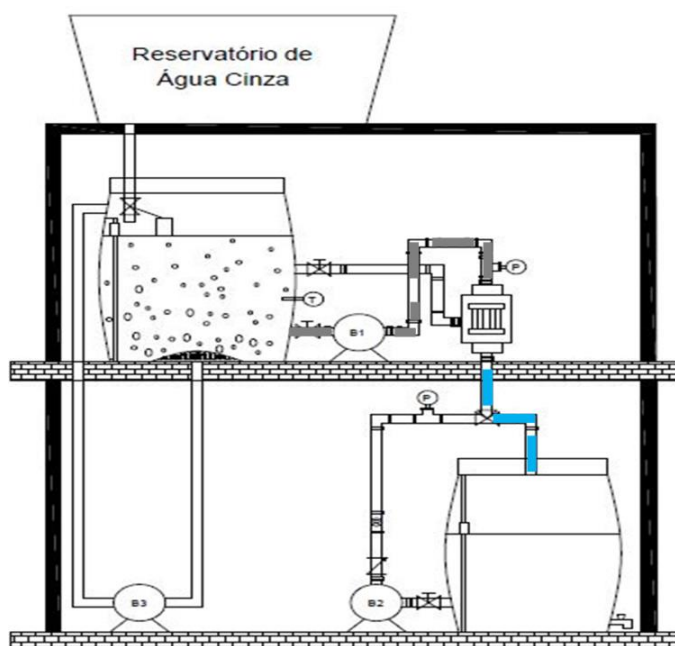
Figura 14 - Operação em produção de água de reúso.



Fonte: Próprio autor.

Em um sistema convencional a cada 30 minutos de operação normal o sistema é interrompido, onde a bomba B2 realiza o bombeamento no sentido reverso (retrolavagem), bombeando a água filtrada do reservatório inferior para o reservatório superior desprendendo o excesso de partículas sólidas da membrana e aumentando sua eficiência de filtração conforme foi detalhado anteriormente. A Figura 15 demonstra o funcionamento do sistema em modo filtração.

Figura 15 - Operação de filtração.



Fonte: Próprio autor.

3.3 Sistema de automação desenvolvido

O sistema é constituído por uma malha de vazão que controla o permeado (vazão de água cinza gerada), por uma malha de pressão para monitorar a pressão transmembrana que não deve exceder 0,8 bar imposta pelo fabricante e por uma malha de nível que controla o nível do reservatório, evitando que as bombas operem sem água, vindo então a queimar. A medição de temperatura é efetuada apenas com o objetivo de associar a dissociação da água cinza a ser filtrada, não contendo, portanto, informações relevantes para o presente trabalho.

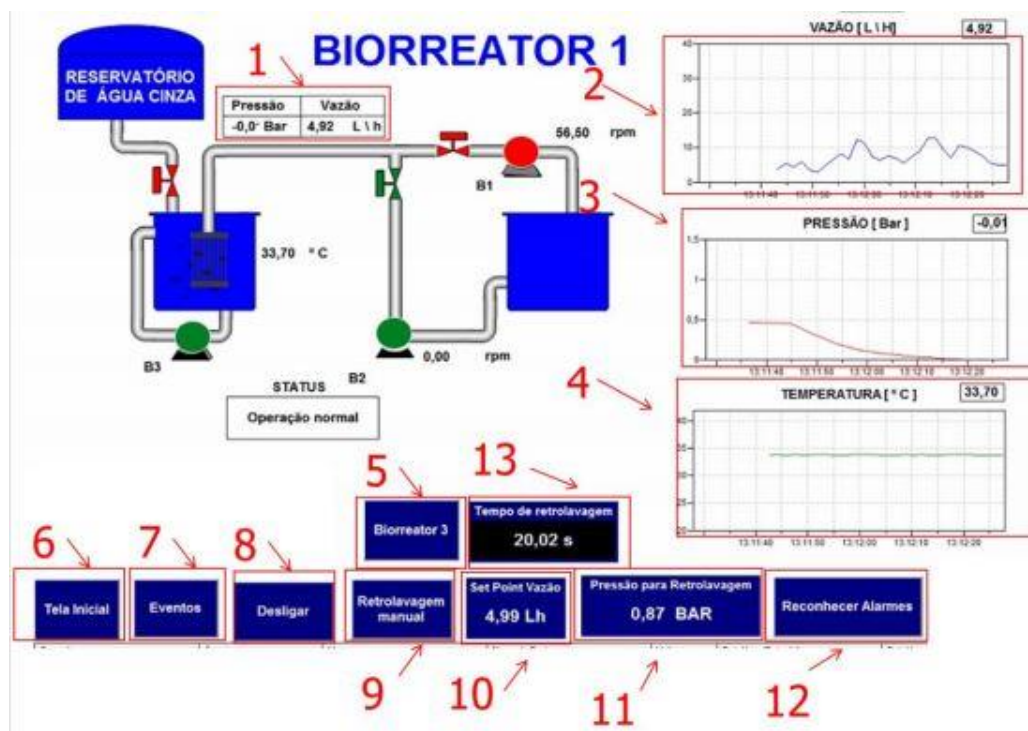
Todas as leituras dos sensores são transmitidas às entradas analógicas do CLP, sendo posteriormente registradas em um sistema supervisório a cada 3 segundos, para posteriores consultas.

Para programação do CLP, optou-se pela linguagem de programação Ladder, devido a sua simplicidade e similaridade com os diagramas de comandos elétricos já bastante difundidos, possibilitando assim que a manutenção do sistema possa ser realizada por uma gama elevada de profissionais, minimizando os custos de manutenção.

As configurações do CLP com o supervisório foram extraídas do site do fabricante (WEG, 2014), o qual disponibiliza o mapa de memória possibilitando a leitura de cada variável independentemente e do supervisório que disponibilizam cursos, manuais e vídeo aulas das configurações de comunicação (ELIPSE, 2014), bem como de montagem da tela supervisória.

A tela implementada encontra-se na Figura 16, na qual indica o estado de cada equipamento e das variáveis monitoradas. A Tabela 2 descreve a função de cada botão de interface e o que representa cada gráfico.

Figura 16 - Interfase do supervisor para o processo de tratamento.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 - Função de cada elemento da interface.

Número	Função
1	Indica os valores em tempo real da pressão e vazão respectivamente.
2	Indica os valores da vazão da última hora.
3	Indica os valores da pressão da última hora.
4	Indica os valores da temperatura do reservatório 1 da última hora.
5	Botão para abrir a tela do Biorreator 3 (em desenvolvimento).
6	Botão para abrir a tela inicial do supervisor.
7	Botão para abrir a tela eventos, onde são armazenando todos os valores de pressão e vazão armazenados.
8	Desliga todas as bombas do sistema e interrompe toda a operação do Biorreator 1.
9	Realiza a retrolavagem manualmente, Caso este botão seja acionado, a retrolavagem é mantida e só é finalizada se este o botão for desabilitado ou o reservatório 2 atinja o nível mínimo (evitando que a bomba opere sem água).
10	Valor desejado para a vazão do sistema.
11	Pressão para que a retrolavagem seja realizada, Se a pressão de operação for maior que a pressão definida pelo usuário a retrolavagem será realizada automaticamente pelo tempo definido no quadro 13.

12	Alarme para indicar a condição anormal de operação.
13	Tempo de retrolavagem.

Fonte: Próprio autor.

3.4 Monitoramento do processo

Para a verificação da capacidade de detecção e diagnóstico de falhas na metodologia proposta, o biorreator foi posto em operação por tempo suficientemente grande para que os parâmetros de normalidade fossem extraídos.

Para este estudo, foi utilizado apenas um setpoint de operação, uma vez que os processos na prática fazem uso deste artifício, pois o tratamento da água cinza divide-se em dois processos distintos, sendo um biológico e outro físico, onde o primeiro ocorre no próprio reservatório de água cinza e o segundo ocorre com o bombeamento do fluxo transmembrana. Desta forma, para que o processo biológico ocorra faz-se necessário que haja um tempo de retenção do sistema, para obtenção do melhor sistema de filtração o artifício utilizado é a operação com setpoint constante (10 L/h) para que este tempo de retenção seja atingido.

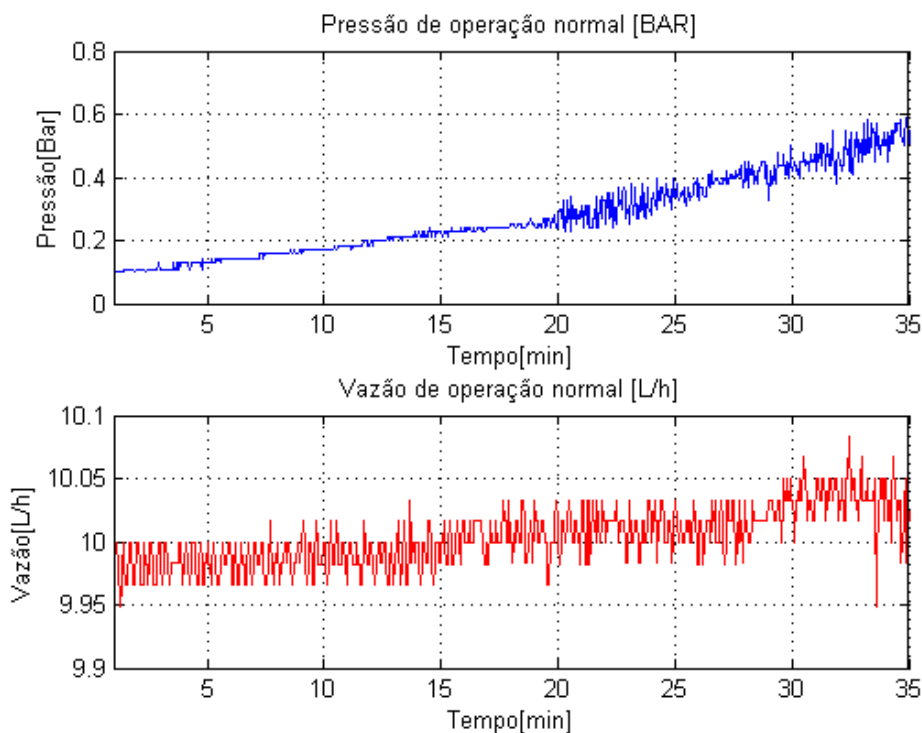
Com auxílio de especialista do processo, selecionou-se quais falhas deveriam ser detectadas para extrair a máxima eficiência do sistema e garantir a segurança dos usuários finais. As falhas selecionadas foram:

- Saturação da membrana;
- Ruptura da membrana.

Treinamento

A primeira etapa de aprendizado é destinada ao treinamento dos limites de normalidade para que estes sejam distinguidos da condição anômala. Como a quantidade de dados amostrados para treinamento de normalidade é relativamente alta (12 meses de operação), o teorema do limite central permite dizer que a média e o desvio padrão das médias amostrais convergem para a média e o desvio padrão populacionais, conforme detalhamento anterior. A Figura 17 detalha a condição de normalidade do sistema, onde observa-se que o tempo de operação antes que a retrolavagem seja realizada é de aproximadamente 35 minutos.

Figura 17 - Processo operando normalmente para o set-point estabelecido.



Fonte: Próprio autor.

Além destes dados, para o cálculo dos limites, é também necessário definirmos o nível de significância α o qual foi definido como 1%.

Uma vez definido a condição de normalidade, trataremos separadamente cada falha para facilitar a compreensão. Para efeito de simplificação de notação, a pressão transmembrana será chamada de P e a vazão de permeado de F .

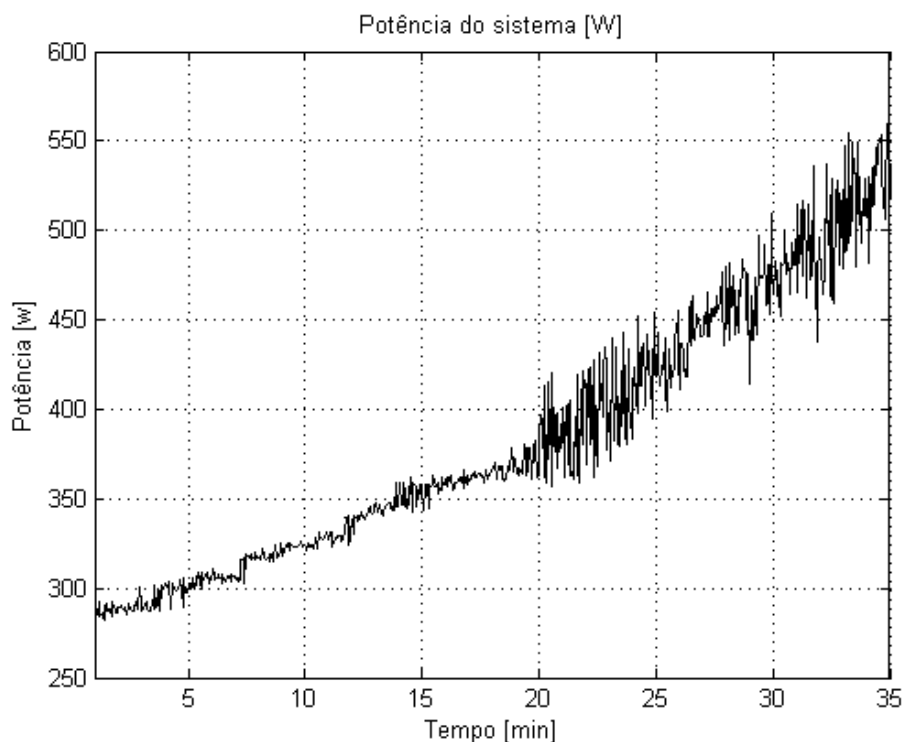
3.4.1.1 Saturação da membrana

A saturação da membrana ocorre quando ela é mantida operando por tempo elevado sem retrolavagem ou com retrolavagem inadequada, gerando acúmulo de sólidos na parede interna. Desta forma o limite superior de pressão (0,6 bar) atingindo em tempo reduzido (muito menor que os 35 minutos de operação normal).

Outra variável diretamente afetada é o consumo de energia elétrica do sistema. Uma vez que a bomba precisa aumentar sua rotação para que a vazão de setpoint seja atingida e dado ela representa mais do que 80% do consumo total do sistema, observa-se na Figura 18

que a medida que a pressão aumenta devido a obstrução da membrana, o consumo de energia elétrica tem um crescimento acentuado.

Figura 18 - Potência consumida.



Fonte: Próprio autor.

Para detecção da falha de saturação, será realizado o uso da pressão P medida. Analisando-se a Figura 18, verifica-se que a pressão tem seu crescimento dado por uma reta com inclinação quase constante, o que nos possibilita trabalhar com a derivada do sinal da pressão.

O sinal derivado pode ser obtido pela equação:

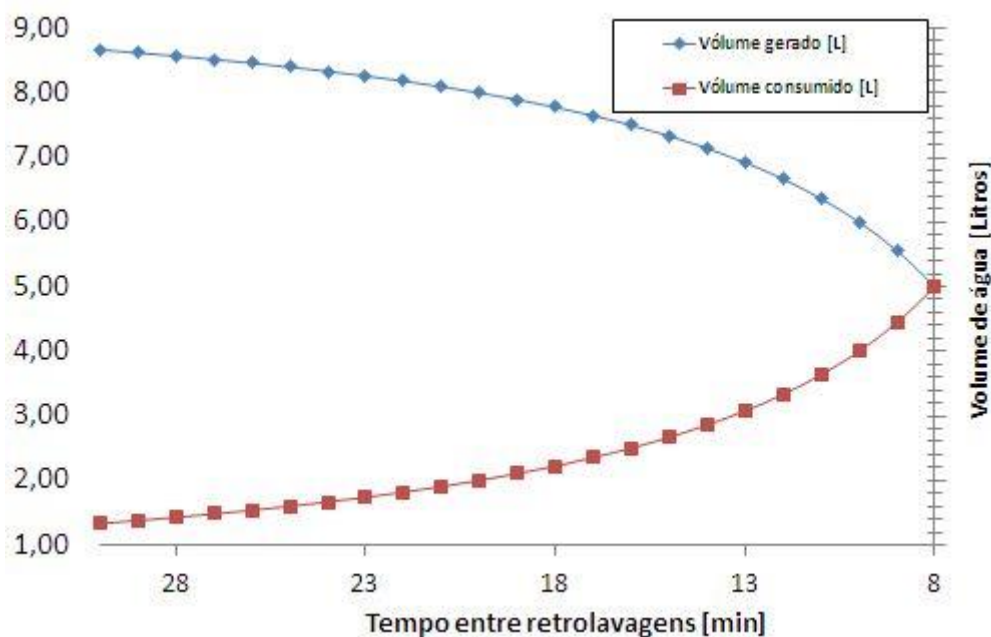
$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_k - P_{k-1}}{Ts} \quad (17)$$

- $\frac{dP}{dt}$ é a derivada da pressão;
- P_k é a amostra atual;
- P_{k-1} é amostra no instante anterior;
- Ts período de amostragem.

O ponto primordial para análise com a utilização da derivada consiste em determinar o incremento entre as amostras, já que se tomarmos amostras muito próximas teremos muito ruído e se tomarmos amostras muito distantes, teremos que armazenar muitos dados na memória do CLP.

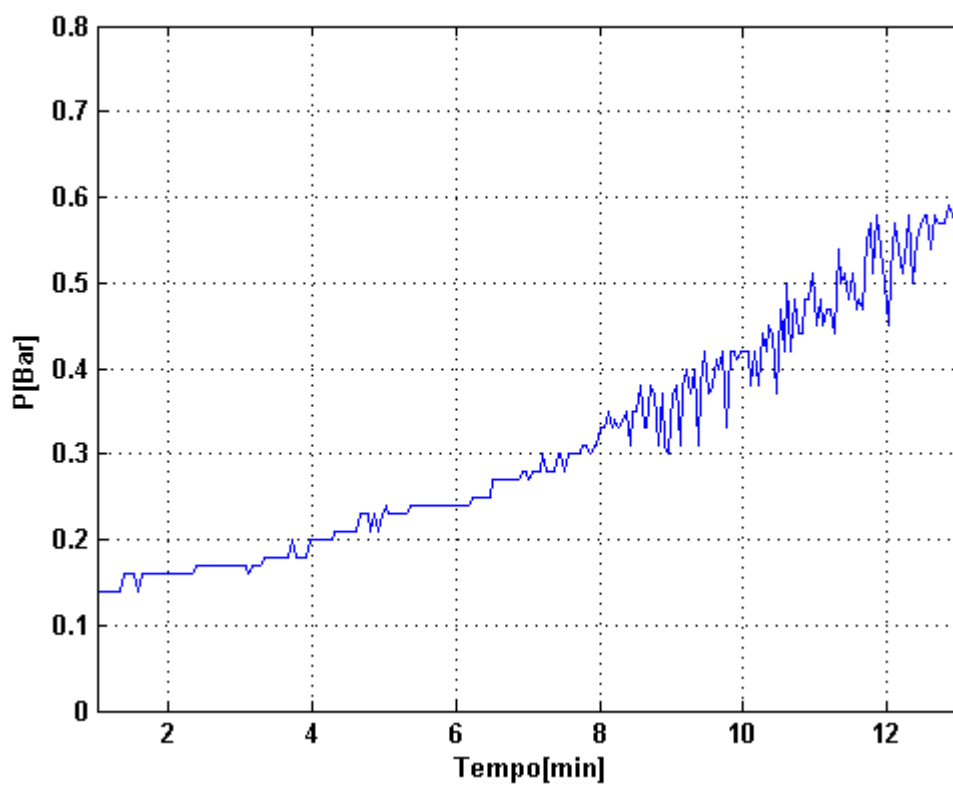
Outra possibilidade para detecção da falha de saturação pode ser realizada analisando o tempo entre retrolavagens, pois a medida que a membrana se satura este tempo tende a diminuir, tornando frequente as retrolavagens e consumindo mais água tratada para retrolavagem do que a própria geração. A Figura 19 mostra a relação da água consumida para realização da limpeza x água gerada para reúso, onde observamos que o tempo crítico é de 8 minutos, tempo esse no qual o balanço de água gerada é nulo.

Figura 19- Volume gerado X Volume consumido.



A Figura 20 mostra o comportamento da pressão P para operação com a membrana saturada, onde percebe-se que ela atinge o limite de 0,6 bar estabelecido, em aproximadamente 13 minutos de operação.

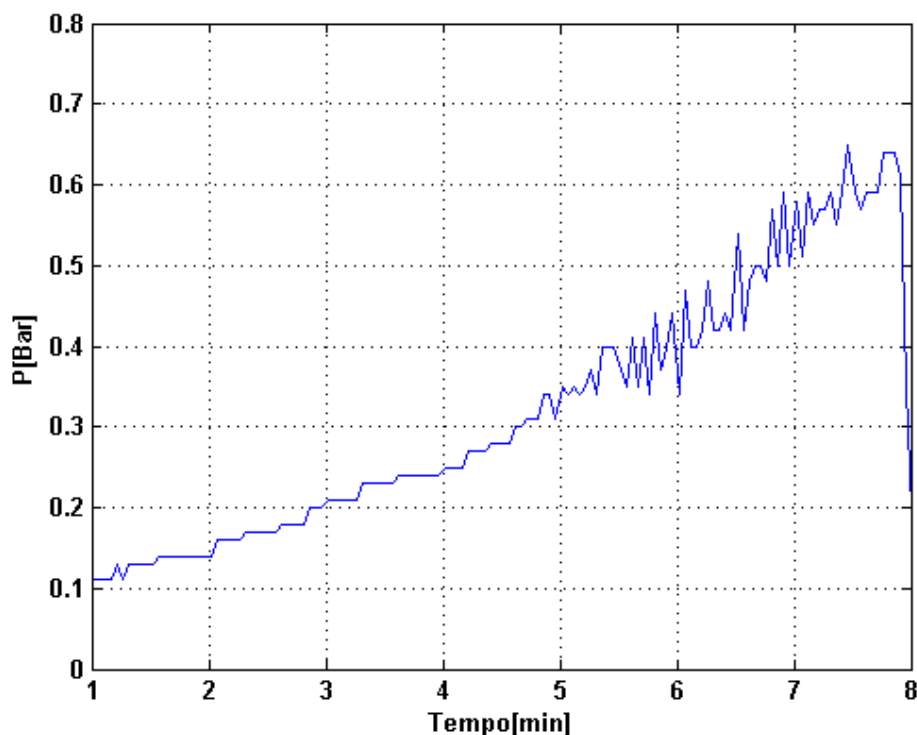
Figura 20 - Pressão de operação com membrana saturada.



Fonte: Próprio autor.

Para detecção da falha de saturação fez-se uso de um bloco contador (já disponível em Ladder no CLP), tornando fácil a detecção e posterior sinalização para o usuário. A Figura 21 demonstra a tendência de decremento do tempo entre retrolavagens caso a falha não seja detectada, onde nota-se que o tempo de retrolavagem reduziu para apenas 8 minutos, inviabilizando o sistema de tratamento para operação neste ponto, já que seria necessário mais água para limpeza da membrana do que a própria capacidade de geração do sistema.

Figura 21 - Pressão de operação com membrana saturada e mantida em operação.



Fonte: Próprio autor.

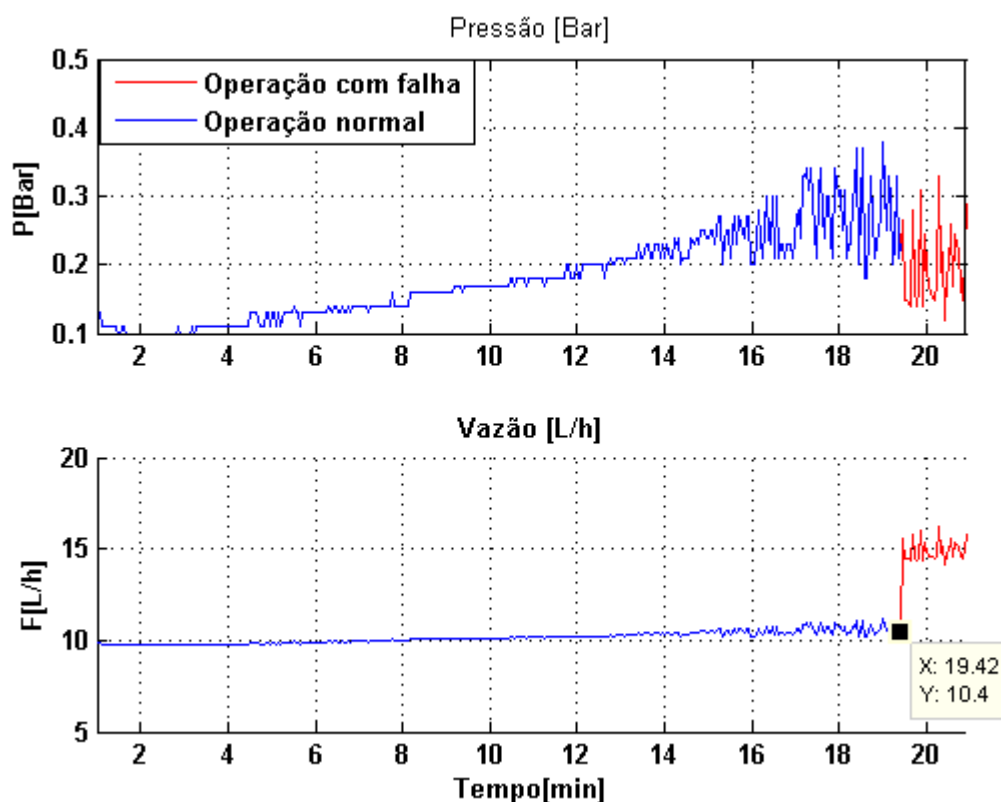
3.4.1.2 Ruptura da membrana

A ruptura da membrana é sem sombra de dúvidas a falha mais agravante do ponto de vista de segurança dos usuários, uma vez que, se a sua ruptura interna não for identificada pode expor os usuários a contaminantes. Considere o caso extremo no qual a membrana perdeu totalmente sua capacidade de filtração em função da degradação dos seus poros internos. É evidente que a água que será utilizada pelo sistema de tratamento poderá expor as pessoas a patologias justamente por estar em contato com a referida água sem tratamento adequado.

Em vista do cenário retratado anteriormente, cuidados especiais devem sempre ser levados em consideração, para que tal falha não deixe de ser detectada. O método escolhido para detecção da ruptura da membrana foi a análise multivariável. Neste caso específico, realiza-se o treinamento da condição de operação normal com a pressão e vazão em condições de normalidade e a detecção da falha dar-se-á pelo desvio de uma ou de ambas variáveis.

Por experiência dos especialistas consultados, é de se esperar que no momento da ruptura ocorra um aumento da vazão e uma diminuição da pressão transmembrana, o que pode ser comprovado na Figura 22.

Figura 22 - Falha de ruptura da membrana.

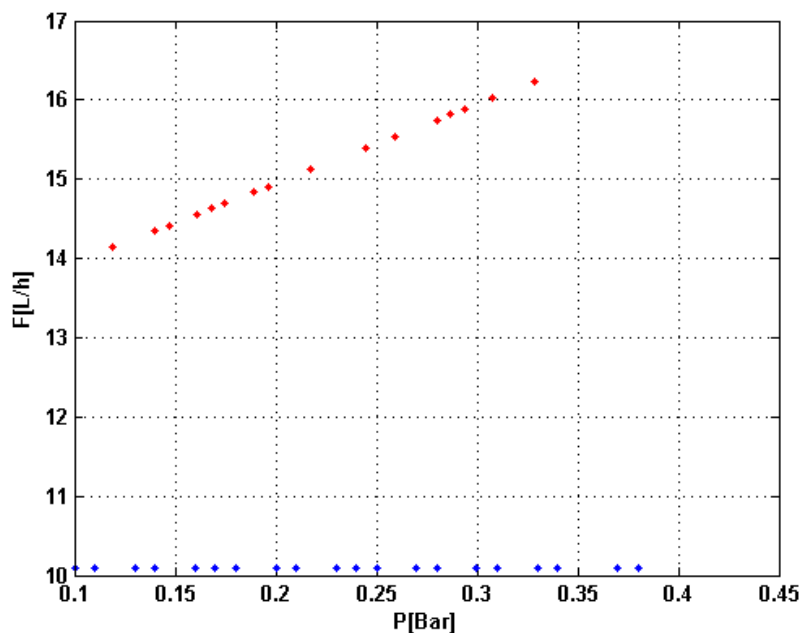


Fonte: Próprio autor.

A Figura 19 mostra que a falha ocorre aproximadamente no instante 19.5 minutos.

O primeiro passo para análise multivariável foi a analisar as regiões de operação para que se pudesse identificar se a falha é detectável ou não. Conforme podemos identificar na Figura 23, as regiões de operação normal e com falha estão bem definidas e não se sobrepõem, possibilitando sua detecção pela análise direta da vazão e pressão.

Figura 23 - Regiões de operação normal (azul) e com falha (vermelho).



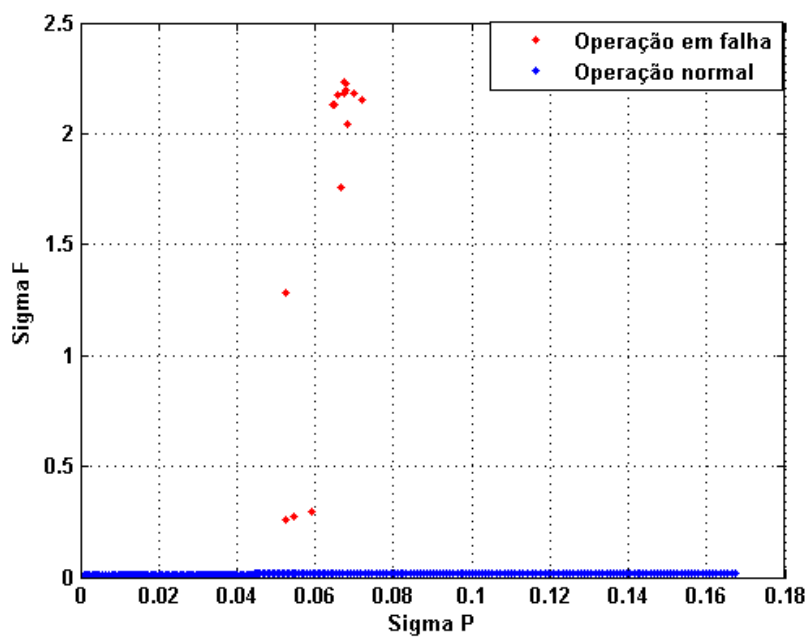
Fonte: Próprio autor.

Em função da relevância da falha de rompimento da membrana, realizou-se a análise de detecção de falha com a utilização dos momentos estatísticos listados abaixo, onde o objetivo principal é confirmar qual variável possibilitaria a detecção com o menor tempo, fator de suma importância, conforme mencionado anteriormente.

- Desvio padrão;
- Média;
- Fator forma;
- Curtose.

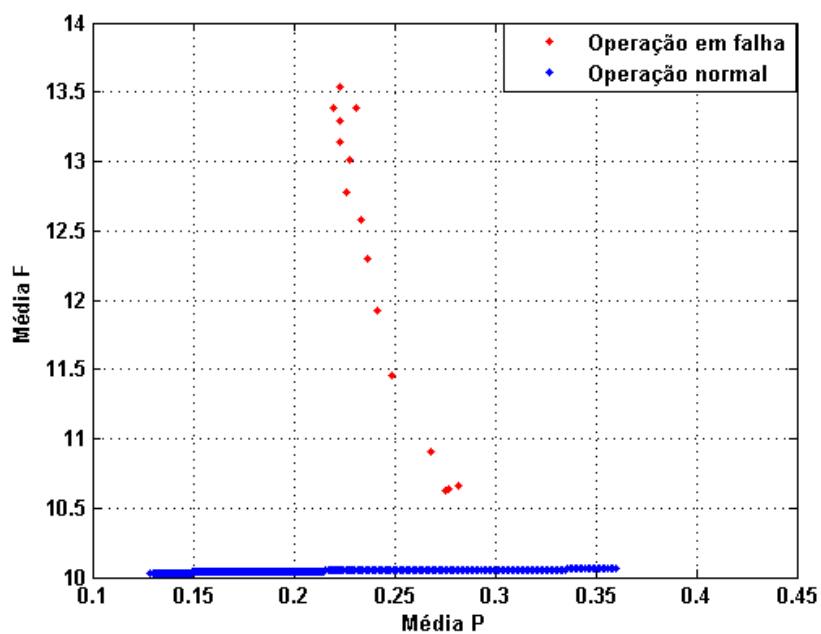
Para medição dos momentos estatísticos, utilizou-se uma janela deslizante que avança uma amostra de cada vez. O resultado está apresentado da Figura 24 a Figura 26, que atestam que as regiões que relacionam o desvio padrão, média e o fator forma podem ser utilizadas para a detecção de falhas. Já no caso da curtose, as regiões de operação estão sobrepostas, impossibilitando a separação das regiões de operação normal e com falha, consequentemente não sendo capaz a detecção da falha com essa variável.

Figura 24 - Desvio padrão para detecção de rompimento da membrana.



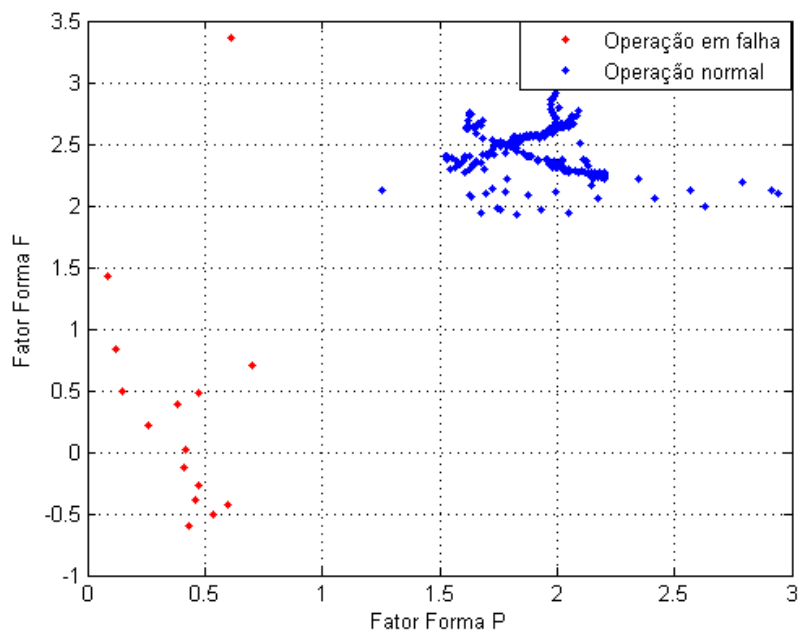
Fonte: Próprio autor.

Figura 25 - Média para detecção de rompimento da membrana.



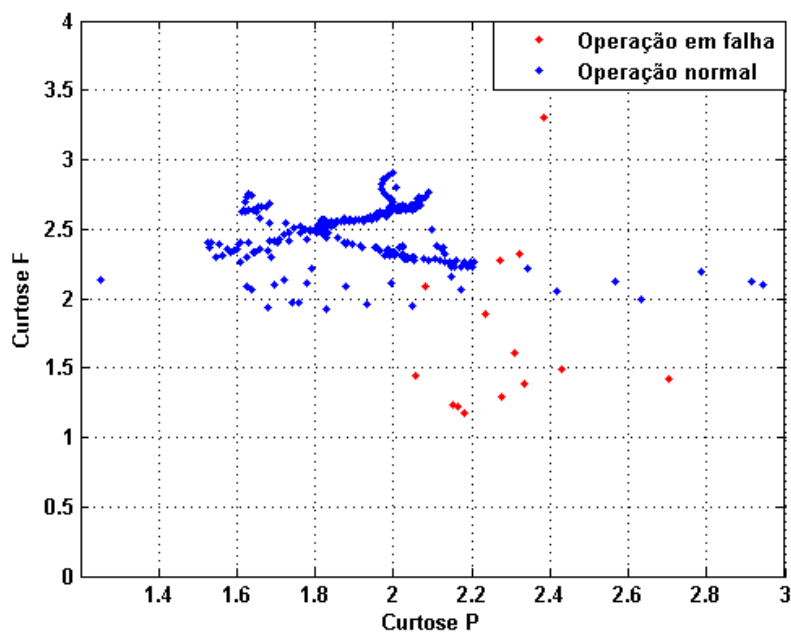
Fonte: Próprio autor.

Figura 26 - Fator forma para detecção de rompimento da membrana.



Fonte: Próprio autor.

Figura 27 - Curtose para detecção de rompimento da membrana.

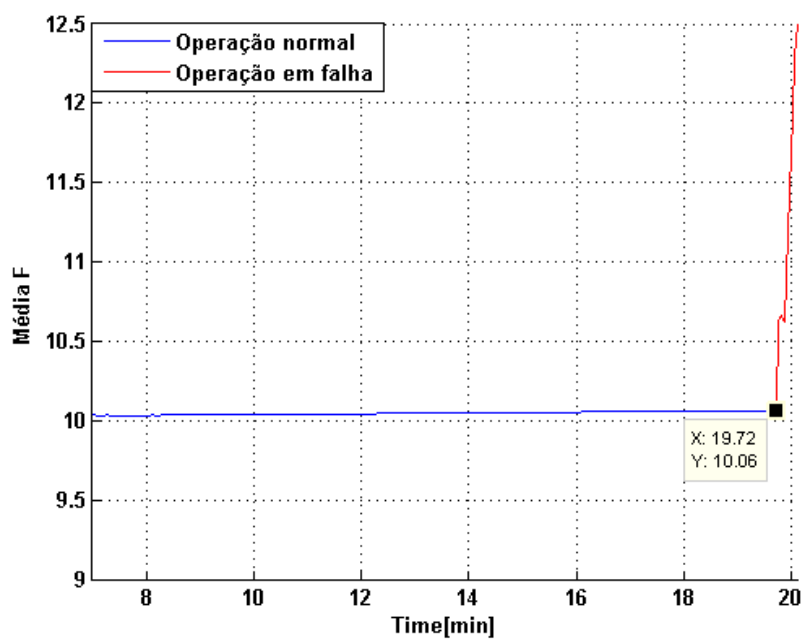


Fonte: Próprio autor.

Os resultados apresentados da Figura 28 a Figura 30, mostram que a falha só pode ser identificada a partir do instante 19,72 min, o que se justifica, uma vez que os momentos

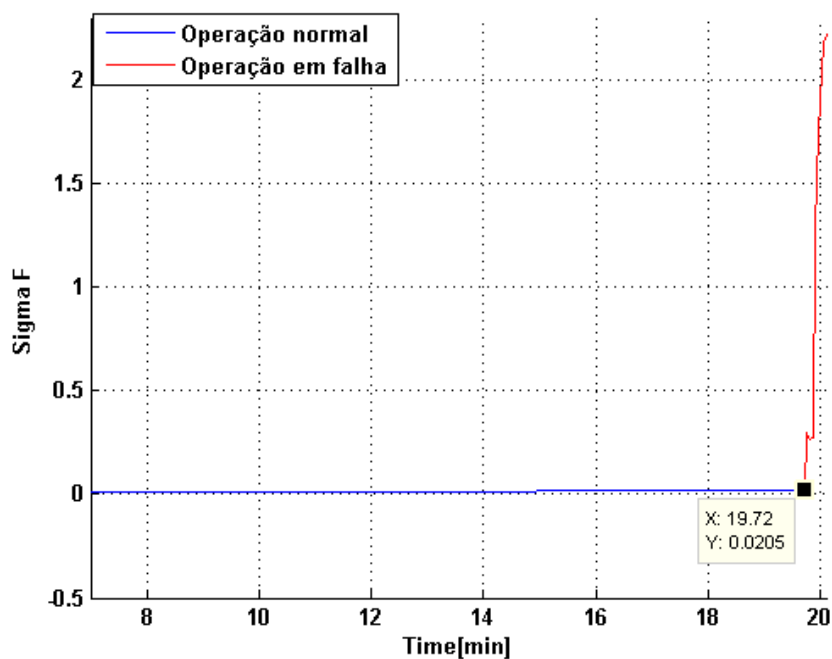
estatísticos necessitam de mais de uma amostra com falha para que os mesmos sofram alteração.

Figura 28 – Média de vazão.



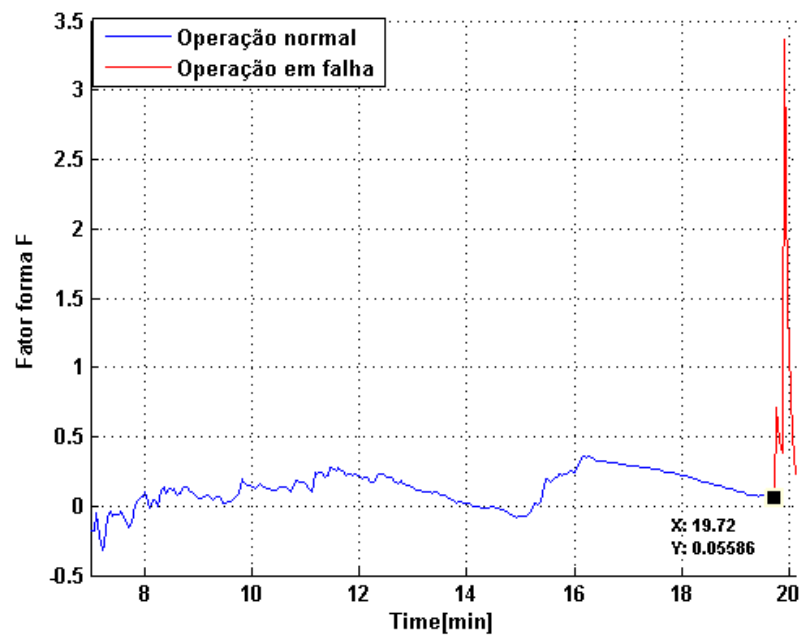
Fonte: Próprio autor.

Figura 29 – desvio padrão da vazão.



Fonte: Próprio autor.

Figura 30 – Fator forma da vazão.



Fonte: Próprio autor.

4 CONCLUSÕES

A abordagem apresentada por este trabalho contribuiu para automatização e detecção de falhas em processos de tratamento residencial, destacando-se como planta piloto para tese de duas dissertações de mestrados na engenharia ambiental (UFES).

O presente trabalho também contribuiu para agregar os conhecimentos multidisciplinares entre os engenheiros ambientais que representam os especialistas do processo e o engenheiro eletricitista que é o responsável pela instalação e configuração do sistema como um todo. Sendo possível identificar e tratar problemas corriqueiros de qualquer sistema que deva ser instalado, tal como a montagem dos sensores, proteções para os dispositivos tais como bomba, sensores, CLP, problemas de ordem prática como cotação de material, especificação de equipamentos, reaproveitamento de equipamentos disponíveis, controle de limites construtivos, entre outros.

5 TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista que todo sistema tem suas características modificadas com o tempo, seja pela diminuição da eficiência dos equipamentos, em especial os equipamentos rotativos, toda a análise realizada necessitaria de um novo treinamento, o que acarretaria em custos adicionais para o usuário. Uma proposta interessante seria a implementação de um algoritmo de treinamento automático, a qual o próprio usuário poderia realizar uma autocalibração do sistema ou um sistema que se autocalibraria com a operação do sistema sem que seja necessária a intervenção do usuário.

Outros pontos relevantes também poderiam ser tratados, como a comunicação com o fornecedor assim que uma falha seja detectada para que este possa oferecer outra membrana ou uma manutenção corretiva para que haja maior comodidade dos usuários e maior integração entre os fornecedores.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, T. **An Introduction into Multivariate Statistical Analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003.

APRENDA.BIO, **Aprenda para conservar**, 2014. Disponível em: <<http://www.aprenda.bio.br/portal/?p=8409>>. Acesso em: 15d de out. 2016

CAMPOS, V. F. **O verdadeiro poder**. [S.l.]: INDG-Instituto de Desenvolvimento Gerencia, 2009.

CHIANG, L. H.; RUSSELL, E. L.; BRAATZ, R. D. **Fault diagnosis in chemical processes using fisher discriminant analysis, discriminant partial least squares, and principal component analysis**. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, Elsevier, v. 50, n. 2, p. 243–252, 2000.

COHIM, E.; KIPERSTOK, A. **Uso de água cinza para fins não potáveis: um critério racional para definição da qualidade**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 24. 2007, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: ABES, v. 2, p. 164. 2007.

COOKE, R.; PAULSEN, J. **Concepts for measuring maintenance performance and methods for analysing competing failure modes**. *Reliability Engineering & System Safety*, Elsevier, v. 55, n. 2, p. 135–141, 1997.

DUDZIC, M.; VACULIK, V.; MILETIC, I. **On-line applications of multivariate statistics at dofasco**. *Proceedings Future Trends in Automation in Mineral and Metal Processing*, p.438–443, 2000.

ELECTRIC, W. **Statistical quality control handbook**. Easton: The Mack Printing Company, 1956.

ELIPSE, KNOWLEDGEBASE. **Comunicação E3 e Clic02**. Disponível em:<Erro! A referência de hiperlink não é válida.>. Acesso em: 20 de mai. 2014.

FRACCHETTA, A. **Automação aplicada ao tratamento de efluentes**. Preservação do meio ambiente. IBDA (Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura). Disponível em:<<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=27&Cod=1370>>. Acesso em: 20 de mai. 2016.

FUENTES, F. F. E. et al. **Metodologia para inovação da gestão de manutenção industrial**. Florianópolis, SC, 2006.

GB-ECOSOLUTIONS, **Reúso de água cinza**, 2016. Disponível em:< <http://www.gb-ecosolutions.com.br/reuso-agua-cinza/>>. Acesso em: 17d de out. 2016

GROBBERIO, Victor. **Detecção e Diagnóstico de Falhas em Processos com Múltiplos Modos de Operação**. *Monografia (Engenharia elétrica – ênfase em Automação)* – Departamento de Engenharia elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2016.

GONÇALVES, R.F (Coordenador). **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. Rio de Janeiro: ABES, p.352. 2009.

HINO, S. Inside the mind of Toyota: **Management principles for enduring growth**. [S.l.]: CRC Press, 2005.

HOGG, R. V.; CRAIG, A. T. **Introduction to Mathematical Statistics**: 3d Ed. [S.l.]: Macmillan, 1970.

HOTELLING, H. **Analysis of a complex of statistical variables into principal components**. *Journal of educational psychology*, Warwick & York, v. 24, n. 6, p. 417, 1933.

JACKSON, J. E. **A user's guide to principal components**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005.v. 587.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. et al. **Applied multivariate statistical analysis**. [S.l.]: Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2002. v. 5.

KOURTI, T. **Process analysis and abnormal situation detection**: from theory to practice. *IEEE control systems*, IEEE, v. 22, n. 5, p. 10–25, 2002.

KRUGER, U.; XIE, L. **Advances in statistical monitoring of complex multivariate processes: with applications in industrial process control**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.

MACGREGOR, J. F.; KOURTI, T. **Statistical process control of multivariate processes**. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 3, n. 3, p. 403–414, 1995.

MAY, Simone. **Caracterização, Tratamento e Reúso de Águas Cinza e Aproveitamento de Águas Pluviais em Edificações**. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. p.223.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.

MURRAY-SMITH, R.; JOHANSEN, T. **Multiple model approaches to nonlinear modelling and control**. [S.l.]: CRC press, 1997.

NGHIEM, L.D.; OSCHMANN, N.; SCHAFER, A.I. **Fouling in greywater recycling by direct ultrafiltration**. 1 ed, p.187, 283-290, *Desalination*, 2006.

PEASON, K. **On lines and planes of closest fit to systems of point in space**. *Philosophical Magazine*, v. 2, p. 559–572, 1901.

PIOVOSO, M.; KOSANOVICH, K.; YUK, J. **Process data chemometrics**. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, IEEE, v. 41, n. 2, p. 262–268, 1992.

ROBERTO, C.. **Sistemas de Controle teoria e projetos**. 1. ed. São Paulo: Érica, 1989. Cap. 1, p.13-18.

SINDUSCON. **Conservação e reúso de água em edificações**. São Paulo. Prol Editora Gráfica, 2005.

UOL ARQUITETURA, **Tire Suas Dúvidas**, 2010. Disponível em: <<http://casaeimoveis.uol.com.br/tire-suas-duvidas/arquitetura/como-e-o-sistema-paraaproveitar-agua-da-chuva.jhtm>>.Acesso em: 25d de mai. 2016

WEG, **Manuais**, 2014. Disponível em:<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-rele-programavel-clic-02-3rd-manual-portugues-br.pdf>>.Acesso em: 25d de mai. 2014

WIREMAN, T. **Benchmarking best practices in maintenance management**. [S.l.]: Industrial Press Inc., 2004.