



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



# **Sistema detector de vazamentos em instalações prediais de água fria**

**Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo**

Orientador: Prof. Dr. André Laurindo Maitelli

**Dissertação de Mestrado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN (área de concentração: Automação e Sistemas) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Número de ordem: M444  
Natal, RN, janeiro de 2015

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede  
Catalogação da publicação na fonte.

Araújo, Ícaro Bezerra Queiroz de.

Sistema detector de vazamentos em instalações prediais de água fria / Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo - Natal, 2015

57 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. André Laurindo Maitelli.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

1. Detecção de vazamentos – Dissertação. 2. Automação residencial - Dissertação. 3. Sistema especialista - Dissertação. 4. Sistema baseado em regras - Dissertação. I. Maitelli, André Laurindo. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

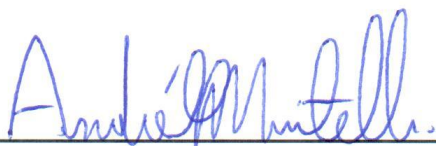
RN/UF/BCZM

CDU 628.147.25

# Sistema detector de vazamentos em instalações prediais de água fria

**Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo**

Dissertação de Mestrado aprovada em 30 de janeiro de 2015 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:



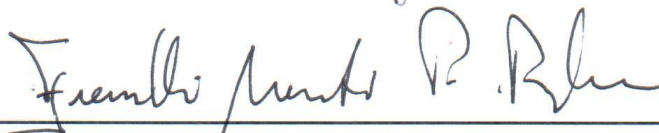
---

Prof. Dr. André Laurindo Maitelli (orientador) ..... DCA/UFRN



---

Prof. Dr. Fábio Meneghetti Ugolino de Araújo ..... DCA/UFRN



---

Prof. Dr. Franklin Martins Pereira Pamplona ..... IFPB



---

Prof. Dr. Anderson Luiz de Oliveira Cavalcanti ..... DCA/UFRN

*Aos meus pais, por me servirem de  
exemplo e inspiração.*

---

# Agradecimentos

---

À Deus, por ter cuidado da minha família em minha ausência.

Ao meu orientador, professor André Maitelli, sou grato pela oportunidade e orientação.

Aos meus pais, por todo o apoio durante esta jornada.

À minha irmã, Iana Bezerra, pela paciência que ela teve comigo todos esses anos.

À minha namorada, Winnie de Lima Torres, pelo apoio, carinho e compreensão durante o tempo que passei distante.

Aos meus amigos Márcio Emanuel e Ana Carla, pelo companheirismo e amizade durante todo o mestrado.

Ao professor Fábio Meneghetti, por todo o auxílio prestado e pelos sábios conselhos durante a realização deste trabalho.

Aos amigos e colegas, Amanda, Gaspar, Igor, Carlos, Kennedy e Daniel pelos momentos de descontração e pela ajuda com o trabalho.

Ao LAUT (Laboratório de Automação em Petróleo), pela estrutura para a pesquisa.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

---

# Resumo

---

Instalações prediais de água fria são partes fundamentais em qualquer modelo de habitação, sejam residências ou condomínios. Porém, tais sistemas estão sujeitos a falhas, que podem variar desde um vazamento em um aparelho, até falhas na estrutura dos reservatórios de água e sistema de distribuição. Estas falhas são responsáveis por altos custos econômicos e ambientais. Visando reduzir estas perdas, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema capaz de detectar a presença e identificar alguns tipos de vazamentos de água que venham a ocorrer. Para implementação e testes, no simulador desenvolvido, foi utilizado um modelo de consumo capaz de reproduzir o comportamento semelhante ao processo real, assim como suas conseqüentes falhas. A detecção dos vazamentos é feita com base em um modelo semelhante a um sistema especialista que possui dois módulos de detecção, um passivo e outro ativo, os quais utilizam sensores e atuadores (válvulas). Para teste e implementação, foi desenvolvido um software capaz de acoplar o sistema simulador e o detector. A partir dos resultados obtidos nota-se que o sistema proposto neste trabalho, além de funcionar de forma satisfatória, pode ser facilmente implementando em microcontroladores ou sistemas embarcados devido a sua simplicidade.

**Palavras-chave:** detecção de vazamentos, automação residencial, sistema especialista, sistema baseado em regras.

---

# Abstract

---

Building installations of cold water are key parts in any model of housing, are homes or condos. However, these systems are subject to failure, which can range from a leak in a device until faults in the structure of water reservoirs and distribution system. These faults are responsible for great economic and environmental costs. In order to reduce these losses, this work proposes the development of a system able to detect the presence and identify some types of water leaks that may occur. For implementation and testing, consumption model was used in a simulator capable of reproducing a similar behavior to a real model and its consequent failures. The detection of leaks is done based on an expert like model having two detection modules, one active and one passive, which use an array of sensors and actuators (valves) to do the sensing. For testing and implementation has been developed a software capable of coupling the system simulator and detector. From the results it can be seen that the system proposed in this work, as well as functioning satisfactorily, can be easily implemented in microcontrollers or embedded systems due to its simplicity.

**Keywords:** leak detection , home automation , expert system, rule-based system.

---

# Sumário

---

<b>Sumário</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Abreviaturas e siglas</b>	<b>v</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	2
1.2 Objetivo . . . . .	3
1.3 Organização do trabalho . . . . .	4
<b>2 Estado da arte</b>	<b>5</b>
2.1 Considerações finais do estado da arte . . . . .	8
<b>3 Instalação predial de água fria</b>	<b>9</b>
3.1 Formas de distribuição de água fria . . . . .	9
3.2 Perfil de consumo residencial . . . . .	11
3.3 Considerações finais de instalações prediais de água fria . . . . .	14
<b>4 Sistemas Especialistas</b>	<b>15</b>
4.1 Classificação de sistemas especialistas . . . . .	16
4.2 Arquitetura de um sistema especialista . . . . .	17
4.2.1 Base de conhecimento . . . . .	17
4.2.2 Motor de inferência . . . . .	19
4.2.3 Interface do usuário . . . . .	19
4.3 Considerações finais sobre sistemas especialistas . . . . .	19
<b>5 Falhas</b>	<b>20</b>
5.1 Detecção e diagnóstico de falhas . . . . .	21
5.2 Considerações finais sobre falhas . . . . .	23
<b>6 Sistema proposto</b>	<b>24</b>
6.1 Simulador . . . . .	25
6.2 Sistema de Detecção . . . . .	29
6.2.1 Módulo passivo . . . . .	30

6.2.2	Módulo ativo . . . . .	32
6.2.3	Aplicativo desenvolvido . . . . .	33
6.3	Considerações finais sobre o sistema desenvolvido . . . . .	34
<b>7</b>	<b>Resultados</b>	<b>35</b>
7.1	Resultados do simulador . . . . .	35
7.2	Resultados da detecção a partir do módulo passivo . . . . .	36
7.3	Resultados da detecção a partir do módulo ativo . . . . .	39
7.4	Considerações finais dos resultados . . . . .	39
<b>8</b>	<b>Conclusão</b>	<b>41</b>
	<b>Referências</b>	<b>42</b>
<b>A</b>	<b>Tabela de Consumo de aparelhos segundo a NBR5626</b>	<b>44</b>
<b>B</b>	<b>Consumo diário e usos finais de água</b>	<b>45</b>

---

# Lista de Figuras

---

1.1	Distribuição de água doce no planeta. . . . .	1
1.2	Mapa ilustrando a distribuição de água no mundo. . . . .	2
2.1	Sensores acoplados a um duto com presença de vazamento. . . . .	5
2.2	Diagrama do detector de vazamentos via aproximação sensível a falhas. . . . .	6
2.3	Esquema elétrico simplificado do cabo detector. . . . .	7
3.1	Esquema de um sistema de abastecimento direto. . . . .	10
3.2	Esquema de um sistema de abastecimento indireto. . . . .	10
3.3	Esquema de um sistema de abastecimento misto. . . . .	11
3.4	Hidrômetro e <i>data-logger</i> no cavalete de entrada da residência. . . . .	12
3.5	Consumo horário desagregado por pontos de utilização. . . . .	13
4.1	Componentes da arquitetura de um sistema especialista. . . . .	18
5.1	Tipos de falhas quanto ao tempo. . . . .	21
5.2	Diagrama do processo de detecção e diagnóstico de falhas. . . . .	22
6.1	Esquema das válvulas e sensores. . . . .	25
6.2	Válvula na alimentação de um reservatório de água para controle de nível. . . . .	26
6.3	Gráfico da aproximação do comportamento da boia em um reservatório. . . . .	27
6.4	Arquitetura simplificada do sistema proposto neste trabalho. . . . .	29
6.5	Arquitetura simplificada do banco de dados. . . . .	30
6.6	Diagrama de blocos que representa o sistema. . . . .	30
6.7	Tela do aplicativo que mostra a leitura dos sensores e o histórico. . . . .	33
6.8	Tela do simulador do aplicativo. . . . .	33
6.9	Tela do sistema de detecção do aplicativo. . . . .	34
7.1	Dados gerados pelo simulador do consumo. . . . .	35
7.2	Resposta do módulo passivo para os três tipos de vazamentos. . . . .	36
7.3	Sistema simulado com a presença de um vazamento na alimentação. . . . .	37
7.4	Detalhes do vazamento e do sinal de detecção. . . . .	38
7.5	Sistema simulado com a presença de um vazamento na residência. . . . .	38
7.6	Detalhes do vazamento na residência e do sinal de detecção. . . . .	39
7.7	Detecção de vazamento na entrada utilizando o módulo ativo. . . . .	40
7.8	Detecção de vazamento no reservatório utilizando o módulo ativo. . . . .	40

---

# Lista de Tabelas

---

6.1	Medição de consumo em aparelhos sanitários . . . . .	28
A.1	Vazão nos pontos de utilização em função da peça de utilização . . . . .	44
B.1	Consumo médio diário por tipo de aparelho (litros por dia) . . . . .	45
B.2	Percentuais relativos dos aparelhos no consumo diário médio . . . . .	46
B.3	Consumo médio diário per capita por ponto de utilização e por morador .	46

---

# Lista de Abreviaturas e siglas

---

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC:	Analog Digital Conversor
DDF:	Detecção e Diagnóstico de Falhas
DICA:	Dispositivo Condicionador e Armazenador de Dados
DSP:	Digital Signal Processor
IA:	Inteligência Artificial
IBGE:	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LDIA:	Leak Detection and Isolation Algorithm
ONU:	Organização das Nações Unidas
PVC:	Policloreto de polivinila
RNA:	Rede Neural Artificial
SMS:	Short Message Service

---

# Capítulo 1

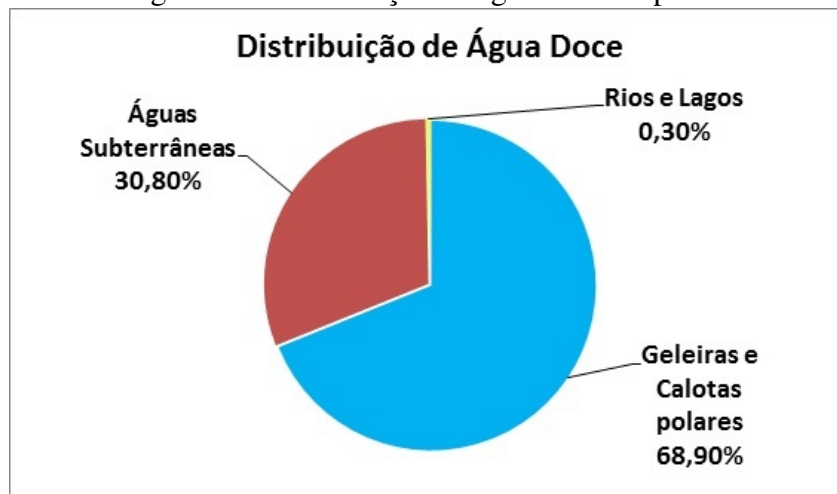
## Introdução

---

A água é considerada como elemento base da constituição dos seres vivos e na manutenção de toda a vida no planeta. Ela não é apenas importante, mas indispensável para a vida humana, representando em média cerca de 60% do peso de um adulto, sendo o principal componente das células e um solvente biológico universal.

Segundo Rebolças (2004), o planeta possui 70% de sua superfície coberta por água. No entanto, 97,5% desse volume encontra-se nos mares ou oceanos e, portanto, trata-se de água salgada, imprópria para o consumo e utilização humana. Dos 2,5% restantes de água doce, 68,9% encontram-se nas calotas polares e geleiras e 30,8% constituem as águas subterrâneas. A água dos rios e lagos representa apenas 0,3% do total de água doce do planeta (Ver Figura 1.1).

Figura 1.1: Distribuição de água doce no planeta.



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar da grande quantidade de água no planeta, apenas uma pequena porcentagem dela é própria para o consumo humano, como mostrado na Figura 1.1. E, mesmo assim, a água ainda é tratada como um recurso infinito. Por conta disso, algumas cidades já vem sofrendo com a escassez deste recurso. Visando minimizar este problema, é pro-

posto, neste trabalho, um sistema capaz de reduzir o desperdício de água em prédios e residências.

## 1.1 Motivação

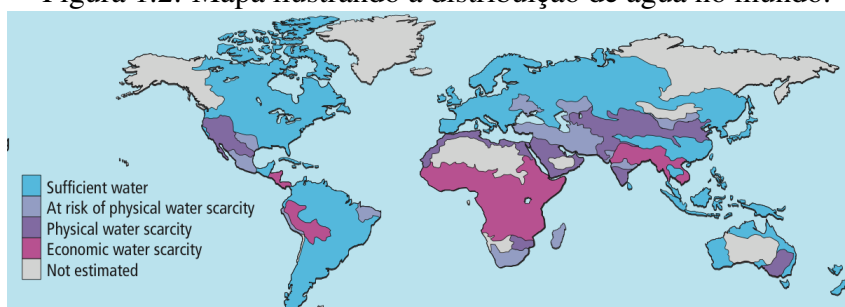
O artigo 10 da Declaração Universal dos Direitos da Água publicado pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 1992 diz que: "A água faz parte do patrimônio do planeta. Cada continente, cada povo, cada nação, cada região, cada cidade, cada cidadão é plenamente responsável aos olhos de todos". Porém, enquanto a população mundial cresce à razão de 90 milhões de pessoas a cada ano, a quantidade de água no mundo tem permanecido quase constante nos últimos 500 milhões de anos e, ainda segundo a ONU, em menos de cinquenta anos, 45% da população mundial estarão sofrendo com a falta de água. (CAMARGO, 2002).

Enquanto a demanda por água vem aumentando proporcionalmente ao crescimento populacional, o nível de água no planeta continua o mesmo há milhares de anos devido ao ciclo hidrológico. Em conjunto a isto, a grande quantidade de poluentes jogados na água e o desperdício da mesma vem trazendo a tona um grande risco de falta d'água a nível global.

Entre os principais fatores causadores de escassez de água no mundo, pode-se citar: poluição, ocupação desordenada de áreas, crescimento populacional intenso e mau gerenciamento dos recursos hídricos. Nas cidades, outro fator agravante é o grande desperdício de água nas redes de distribuição e nas residências.

A revista americana *Scientific American*, em 2008, publicou um estudo no qual foi traçado um mapa ilustrando a escassez de água no mundo, (ver Figura 1.2). Segundo o estudo realizado pela revista, espera-se uma crise de escassez de água nos próximos anos, ocasionada pelas mudanças climáticas, e, principalmente, por conta do crescimento populacional, o qual incrementa a demanda por água, além de aumentar também a poluição dos mananciais.

Figura 1.2: Mapa ilustrando a distribuição de água no mundo.



Fonte: *Scientific American Magazine*, 2008

Como mostrado no mapa da Figura 1.2, certas áreas do globo, como por exemplo o norte da África, já sofrem com problemas de escassez física de água; outras correm o risco de ficarem sem água, como o nordeste brasileiro por exemplo; e outras, como a

região leste da América do Sul, sofrem com uma escassez provocada por falta de boas políticas de uso da água.

Camargo (2002) afirma que, em nosso planeta, pelo menos vinte países já sofrem com a escassez de água. Entre eles, estão Egito, Kuwait, Arábia Saudita, Israel, Argélia e Bélgica. No Brasil, o sinal de alerta já chegou a alguns estados, como Pernambuco, Alagoas, Paraíba, Sergipe, Rio Grande do Norte, Distrito Federal e, mais recentemente, São Paulo.

De acordo com dados do Atlas do Saneamento 2011, divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), seis em cada dez municípios com mais de 100 mil habitantes apresentam perdas entre 20% e 50% do volume de água captada. Nas cidades com população inferior, a perda fica em torno de 20% (FREIRE, 2013).

O desperdício de água em um sistema de abastecimento acontece em diversas fases como nas barragens, adutoras, estações e reservatórios de tratamento, rede de distribuição, residências, prédios e na utilização da água de forma incorreta pelas pessoas. Os ambientes residenciais e prediais são responsáveis por grande parcela de desperdício. Em alguns casos, mesmo quando a água é reutilizável, o desperdício demanda um gasto econômico e energético. Nesses casos, a água desperdiçada e, tratada posteriormente, consome recursos e não traz nenhum benefício para o usuário (FREIRE, 2013).

Vazamentos em sistemas de distribuição e armazenamento de água não oferecem risco direto ao ambiente, ao contrário de sistemas de distribuição de petróleo, gás e outras substâncias químicas, entretanto, além do desperdício do recurso, podem causar infiltrações e erosão de estruturas, que podem ocasionar graves acidentes no futuro.

Para minimização destes riscos, da perda econômica e para conservação da água, faz-se necessária a implementação de um processo de controle para detectar e localizar vazamentos em sistemas de distribuição e armazenamento de água. A detecção precoce é o primeiro passo no processo de controle de vazamentos. Esta questão tem servido de motivação para o desenvolvimento de vários trabalhos neste campo de pesquisa (inclusive este), os quais, alguns deles, serão mostrados no capítulo 2.

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema automatizado capaz de detectar vazamentos de água dentro de instalações prediais e residenciais em tempo real, utilizando, para isto, um modelo semelhante aos utilizados em sistemas especialistas. O detector possui dois modos de operação: Um passivo (que funciona mesmo sem a intervenção de um operador externo e não necessita da utilização de atuadores do sistema) e outro ativo (o qual possui parâmetros que dependem da configuração de um operador externo e que faz uso dos atuadores do sistema). Para testes e validação do processo, o consumo em uma residência é simulado através de um algoritmo.

### **1.3 Organização do trabalho**

Para uma melhor compreensão, este trabalho encontra-se dividido em oito capítulos. Neste capítulo introdutório são apresentadas a motivação e o objetivo deste trabalho. No capítulo 2 é feita uma breve revisão sobre outros trabalhos realizados na área de detecção de vazamentos. No capítulo 3 são apresentadas características, conceitos e concepções de distribuição e armazenamento de água em prédios e residências, além de alguns estudos sobre o perfil de consumo e uso final de água, os quais foram utilizados para a realização deste trabalho. No capítulo 4 é feita uma explanação sobre sistemas com inteligência artificial, em especial sistemas especialistas e alguns fundamentos teóricos como classificação e arquitetura. O sistema proposto é apresentado no capítulo 6, os resultados obtidos no capítulo 7 e as conclusões no capítulo 8.

---

## Capítulo 2

### Estado da arte

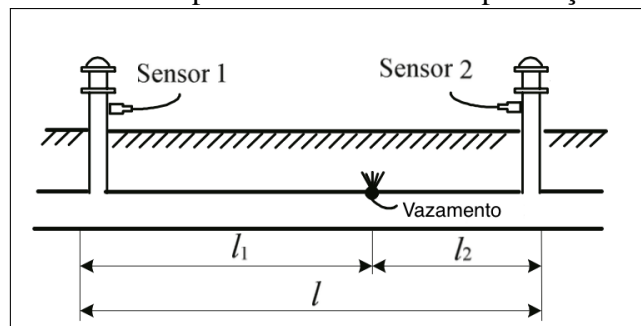
---

Na literatura existem vários trabalhos que abordaram o problema da detecção de vazamentos utilizando vários métodos diferentes.

El-Shiekh (2010) propôs uma classificação para os métodos de detecção de vazamentos em métodos externos e internos. Os externos são feitos fora das linhas de transmissão, através do uso de sensores ou da observação visual da área. A vantagem destes métodos é a não necessidade de desligamento do sistema para instalação ou calibração dos equipamentos de monitoramento. Porém, para altos níveis de fluxo, o ruído provocado pelo fluxo pode mascarar um vazamento. Já os métodos internos são baseados na medição e análise dos parâmetros dos fluidos, tais como ondas de pressão, balanço de massa ou volume e métodos analíticos baseados na modelagem em tempo real. A desvantagem deste tipo de metodologia se encontra na complexidade da análise e modelagem do sistema.

Jin, Yumei e Ping (2010) utilizou um método externo que consiste na detecção de emissões acústicas criadas por vazamentos de líquidos ou gases quando estes atravessam a perfuração nas tubulações. Os dados são coletados através de acelerômetros presos magneticamente aos dutos de transporte (Ver Figura 2.1). A partir da distância  $l$  entre os sensores, das distâncias do vazamento aos sensores  $l_1$  e  $l_2$ , com a utilização de técnicas de correlação e uma rede neural, foi possível fazer a detecção e localização dos vazamentos baseado nos dados coletados.

Figura 2.1: Sensores acoplados a um duto com presença de vazamento.



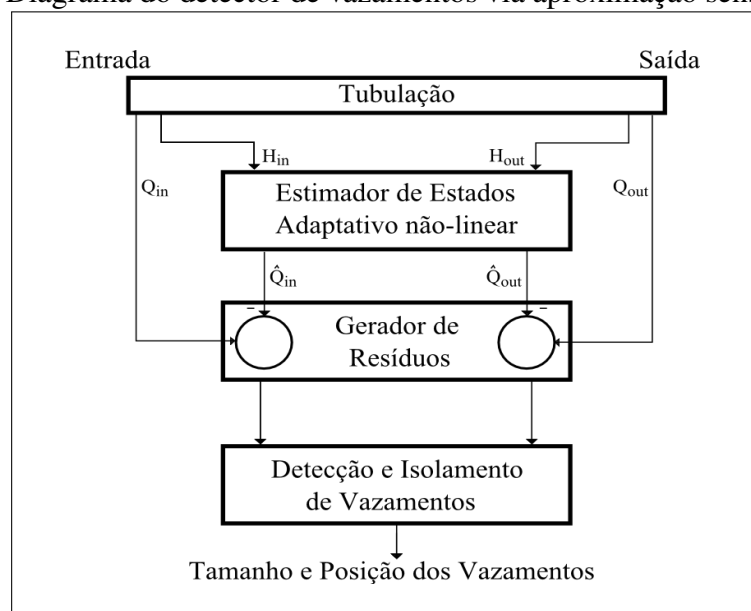
Adaptado de: (JIN; YUMEI; PING, 2010)

Este método também foi utilizado por Tang et al. (2009), o qual utilizou a transformada *Wavelet* para refinar os dados obtidos pelos sensores e depois aplicá-los em uma

correlação cruzada para determinar o local do vazamento.

Outro trabalho que aborda a detecção de vazamentos em sistemas de distribuição de água, mas que utiliza um método interno de detecção, é o de Begovich e Villalobos (2010), no qual foi implementado um algoritmo de detecção e isolamento de vazamentos (*Leak Detection and Isolation Algorithm - LDIA*) *on-line* embarcado em um processador digital de sinais (*Digital Signal Processor - DSP*). Neste trabalho, a informação fornecida por um modelo matemático da dinâmica do sistema foi utilizada para prever a presença de um vazamento no processo e, em seguida, para determinar a sua localização (Figura 2.2). O LDIA usa medições da vazão volumétrica e da pressão nas extremidades das tubulações. Estas medições são analisadas pelo DSP, no qual um estimador de estado adaptativo não-linear é utilizado com base no modelo que representa a dinâmica do sistema.

Figura 2.2: Diagrama do detector de vazamentos via aproximação sensível a falhas.



Adaptado de: (BEGOVICH; VILLALOBOS, 2010)

Onde:

$Q_{in}$ : é o fluxo na entrada;

$Q_{out}$ : é o fluxo na saída;

$H_{in}$ : é a pressão na entrada;

$H_{out}$ : é a pressão na saída;

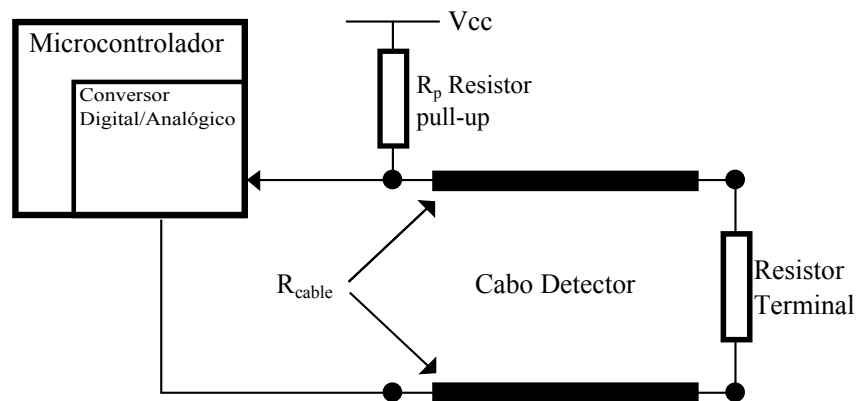
$\hat{Q}_{in}$ : é o fluxo estimado na entrada;

$\hat{Q}_{out}$ : é o fluxo estimado na saída;

O objetivo dos trabalhos citados anteriormente foi o de detectar vazamentos em sistemas dinâmicos de distribuição de água e outros produtos, ou seja, nas tubulações de distribuição. Outros trabalhos na literatura abordaram a detecção de vazamentos em residências e edifícios, especificamente.

Convey e Booth (2002) propuseram um sistema capaz de identificar vazamentos de água em prédios e indústrias, em tempo real, através do uso de um cabo têxtil absorvente que muda as características resistivas na presença de água. As características resistivas deste cabo são tais que ele seco possui uma resistência maior que  $4M\Omega$  e, a medida que o cabo absorve água, a sua resistência é reduzida. A Figura 2.3 mostra de forma simplificada o esquema elétrico do sistema.

Figura 2.3: Esquema elétrico simplificado do cabo detector.



Adaptado de: (CONVEY; BOOTH, 2002)

O sistema de medição é composto pelo cabo detector, um resistor terminal, um resistor *pull-up* (que garante que as entradas se ajustem aos níveis lógicos caso outros dispositivos externos sejam conectados) e um conversor analógico-digital (ADC) de 8 bits para medição da tensão. Este forma um divisor de tensão e a resistência do cabo pode ser calculada pela Equação 2.1 (CONVEY; BOOTH, 2002).

$$R_{cable} = \frac{R_p \times V_{adc}}{V_{cc} - V_{adc}} \quad (2.1)$$

Onde:

- $R_{cable}$ : é a resistência do cabo;
- $R_p$ : é o valor do resistor *pull-up*;
- $V_{cc}$ : é a tensão de alimentação;
- $V_{adc}$ : é a tensão medida através do cabo;

Os dados de cada zona são multiplexados e sequenciados, desta forma o microcontrolador utilizado é capaz de fazer a leitura da tensão de cada zona. Sendo assim, o controlador faz a leitura periódica da tensão e, através da mesma, calcula a resistência de cada zona, gerando um *log* e um alarme para cada falha que possa vir a surgir na zona (CONVEY; BOOTH, 2002).

Gama-Moreno et al. (2010), em seu trabalho, utilizou um sistema de detecção de vazamentos baseado no uso de sensores de pressão (MPX10D) e sensores de vazão que

monitoram várias áreas da residência. Tal sistema se baseia na ideia de que no momento da medição, nenhum dispositivo (torneira, chuveiro, banheira, entre outros) estava sendo utilizado e que não deveria existir nenhum fluxo de água, caso contrário, existe um vazamento. Os dados são enviados via protocolo *ZigBee* para um módulo que processa os dados e envia ao usuário via *Short Message Service* (SMS). O usuário por sua vez pode ler os dados recebidos e, também via SMS, enviar um comando de fechamento de algumas válvulas eletromecânicas, com o objetivo de evitar o desperdício de água.

Assim como Gama-Moreno et al. (2010) e Convey e Booth (2002), o trabalho aqui proposto consiste na detecção de vazamentos não só no sistema de tubulações, mas em todo o sistema de distribuição e armazenamento de água, que variam desde a tubulação de alimentação, sistema de armazenamento e dispositivos finais.

Os trabalhos acima citados funcionam relativamente bem, porém, são métodos mais complexos e que, na maioria deles, necessitam de um especialista para serem instalados e operados. O sistema proposto neste trabalho, foge do ambiente industrial, pois é implementado com foco em prédios e residências, além de utilizar técnicas mais simples de implementação e possuir uma interface de comunicação mais fácil de ser operada, dispensando, assim, a presença de um especialista na área.

## 2.1 Considerações finais do estado da arte

Neste capítulo foram mostrados algumas referências que abordam a problemática tratada neste trabalho através do uso de várias metodologias diferentes. Os trabalhos aqui apresentados, em geral, utilizam técnicas que variam desde o uso de sensores distribuídos por toda a estrutura predial, até técnicas que utilizam métodos avançados de inteligência artificial, como por exemplo, RNAs.

Como citado neste capítulo, este trabalho foi desenvolvido com o intuito de ser utilizado em prédios e residências. Por este motivo, faz-se necessária uma descrição do ambiente onde este trabalho será aplicado.

---

## Capítulo 3

# Instalação predial de água fria

---

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 5626, define água fria como a água à temperatura dada pelas condições do ambiente. Ainda segundo a ABNT, as instalações prediais de água fria devem ser projetadas de modo que, durante a vida útil do edifício que as contém, atendam aos seguintes requisitos:

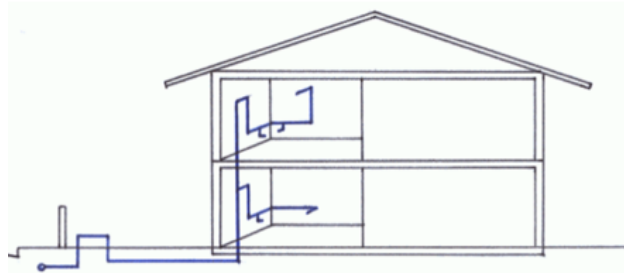
- Preservar a potabilidade da água;
- Garantir o fornecimento de água contínua, em quantidade adequada e com pressões e vazões compatíveis com o perfeito funcionamento dos aparelhos sanitários, peças de utilização e demais componentes;
- Promover a economia de água e de energia;
- Possibilitar manutenção fácil e econômica;
- Evitar níveis de ruído inadequados à ocupação do ambiente;
- Proporcionar conforto aos usuários, prevendo peças de utilização adequadamente localizadas, de fácil operação, com vazões satisfatórias e atendendo as demais exigências do usuário.

### 3.1 Formas de distribuição de água fria

Nas residências, a água pode chegar direto do sistema de distribuição ou ser retirada de poços artesianos, podendo ser diretamente utilizada pelos dispositivos ou armazenada em reservatórios. Quanto à forma de distribuição de água em edifícios, pode-se citar quatro tipos básicos de sistemas (PINTO, s.d.):

**Direto:** A água provém diretamente da fonte de abastecimento, conforme mostra a Figura 3.1. A distribuição direta normalmente garante água de melhor qualidade devido à taxa de cloro residual existente e devido à inexistência de reservatório no prédio. O principal inconveniente da distribuição direta no Brasil é a irregularidade no abastecimento público e a variação da pressão ao longo do dia provocando problemas no funcionamento de aparelhos como os chuveiros. O uso de válvulas de descarga não é compatível com este sistema de distribuição;

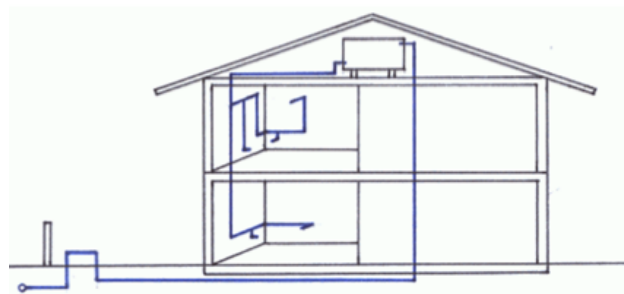
Figura 3.1: Esquema de um sistema de abastecimento direto.



Fonte: (PINTO, s.d.)

**Indireto:** A água provém de um ou mais reservatórios existentes no edifício, conforme mostra a Figura 3.2. Este sistema pode ocorrer com ou sem bombeamento. Quando a pressão for suficiente, mas houver descontinuidade no abastecimento, há necessidade de se prever um reservatório superior e a alimentação do prédio será descendente. Quando a pressão for insuficiente para levar água ao reservatório superior, devem-se ter dois reservatórios: Um inferior e outro superior. Do reservatório inferior a água é lançada ao superior através do uso de bombas de recalque (moto-bombas). O sistema de distribuição indireto com bombeamento é mais utilizado em grandes edifícios, onde são necessários grandes reservatórios de acumulação;

Figura 3.2: Esquema de um sistema de abastecimento indireto.

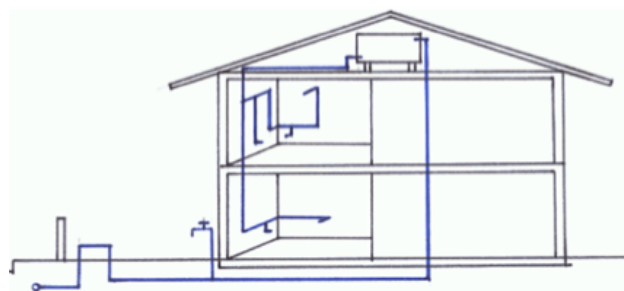


Fonte: (PINTO, s.d.)

**Misto:** O sistema de distribuição misto (Ver Figura 3.3) é aquele no qual existe distribuição direta e indireta ao mesmo tempo. Neste trabalho, o sistema predial simulado é considerado como um sistema de distribuição misto, como será visto mais adiante;

**Hidropneumático:** O sistema hidropneumático utiliza um equipamento para pressurização da água a partir de um reservatório inferior, abastecido pela rede pública. Sua

Figura 3.3: Esquema de um sistema de abastecimento misto.



Fonte: (PINTO, s.d.)

adoção é imperiosa somente quando há necessidade de pressão em determinado ponto da rede, que não pode ser obtida pelo sistema convencional. É o caso de pontos no último pavimento, logo abaixo do reservatório, ou pressão específica para determinados equipamentos industriais, ou ainda, quando não convém construir um reservatório superior. Esse sistema tem custo elevado, exige manutenção e deve ser evitado. Observe que o sistema fica inoperante em caso de falta de energia elétrica, necessitando de um gerador alternativo, para não haver falta de água.

O sistema de distribuição e armazenamento de um prédio ou residência pode ter seu comportamento facilmente aproximado ao de um sistema de fluidos. O transporte dos fluidos (água) é realizado no interior de tubos. Tais tubos, dependendo do tipo e condições do fluido a transportar, podem ser fabricados com os mais diversos materiais: aço, níquel, chumbo, borracha, vidro, plástico, cimento, cobre, bronze e, no caso das instalações prediais para água fria, PVC (Policloreto de polivinila).

A NBR 5626 define que as tubulações devem ser dimensionadas de modo que a velocidade da água, em qualquer trecho de tubulação, não atinja valores superiores a 3 m/s e, para o projeto de um edifício, quais os valores de vazão máxima para cada ponto de utilização em função do aparelho sanitário e da peça utilizada (Anexo A.1).

## 3.2 Perfil de consumo residencial

O consumo de água em um prédio varia de acordo com o tamanho, número de apartamentos, números de aparelhos consumidores, existência de áreas de recreação, jardins, entre outros.

O problema de abastecimento de água nas cidades antes era tratado aumentando a oferta para fazer frente à demanda, mas hoje passou a ser tratado através do controle sobre a demanda. Tendo em vista a preocupação com a crescente escassez de água no mundo, ter conhecimento do perfil de consumo e dos usos finais da água se torna uma informação primordial para a criação de ações de racionalização do uso da água.

Entre junho de 1996 e março de 1998, a *American Water Works Association – Research Foundation* realizou uma pesquisa em 12 cidades americanas sobre o perfil do

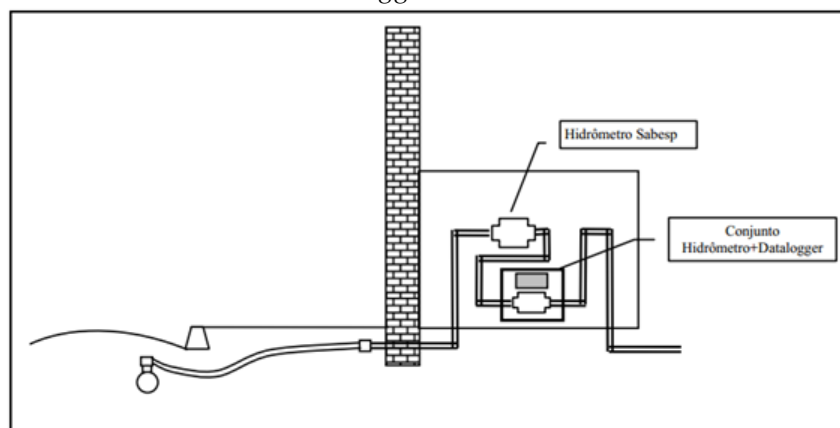
consumo de água, tendo como foco identificar os usos finais da água em 1188 residências registrando as vazões em cada aparelho sanitário a cada 10 segundos e armazenando os valores em *data-loggers* para depois serem coletados e analisados (MAYER; DEOREO, 1999).

No âmbito nacional, pesquisas na área foram feitas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) ao longo das quatro últimas décadas. Em 1981, com o uso de um Dispositivo Condicionador e Armazenador de Dados (DICA), foram investigadas mais de quatrocentas ligações prediais na época. Já no final da mesma década, com o equipamento aprimorado, o IPT realizou outra pesquisa no próprio campus. Já em 1990, foi desenvolvido um programa de tratamento dos dados coletados. Em meados dos anos 90 foi realizado outro estudo para o levantamento do consumo de água em aparelhos sanitários. Entre 1997 e 1998 foi realizado um novo estudo já direcionado para a identificação do perfil de consumo doméstico de água tendo como local de experiência um prédio na zona sul da cidade de São Paulo. O estudo contemplou os seguintes aparelhos: caixa de descarga, chuveiro, lavatório da pia e lavadora de roupas. Este trabalho não contemplou o consumo externo de água. Destaca-se que os trabalhos citados adotaram uma técnica intrusiva de medição, o que significa dizer que, para se obterem os consumos, foi necessária a introdução de um equipamento nas instalações, fato que implica, em alguns casos, a visualização do equipamento pelo usuário (BARRETO, 2008).

Barreto (2008) realizou um estudo sobre o consumo médio de água em uma residência. A pesquisa foi feita em 100 endereços da zona oeste de São Paulo com moradores que consumiam em torno de 15 a 20  $m^3$ /mês de água durante o período de uma semana. O estudo foi feito utilizando-se *data-loggers* junto com o hidrômetro em pontos internos e no cavalete da residência. Os dados eram armazenados e depois coletados.

A Figura 3.4 mostra a configuração da instalação do *data-logger* e do hidrômetro para as medições. Nela é possível observar que o *data-logger* foi colocado junto ao hidrômetro de medição da concessionária de água. Desta forma, o *data-logger* foi capaz de registrar o consumo total de água na residência.

Figura 3.4: Hidrômetro e *data-logger* no cavalete de entrada da residência.



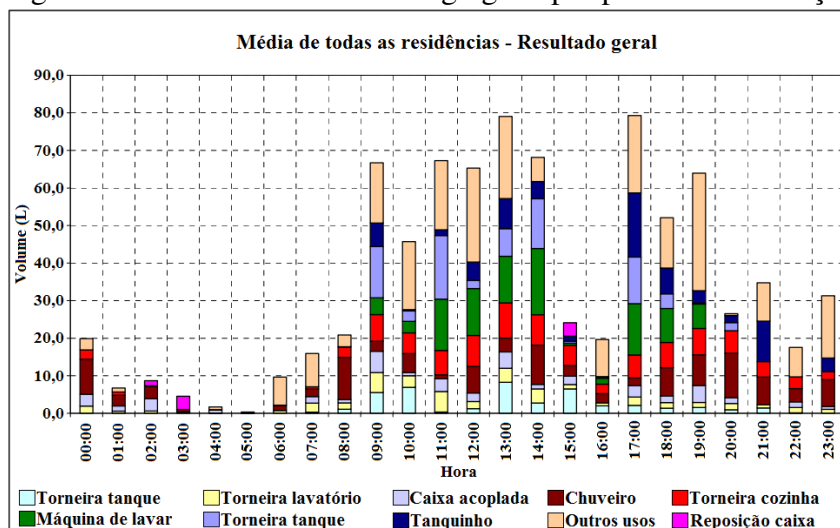
Fonte: (BARRETO, 2008)

Além deste, foram instalados *data-loggers* nos pontos finais de utilização de água, tais como chuveiros, torneiras, máquinas de lavar roupa, entre outros. Desta forma, além do consumo total, foi possível montar um mapa mais detalhado sobre o uso final de água em cada tipo de dispositivo.

O Anexo B apresenta as tabelas com os consumos médios diários obtidos após o tratamento dos dados coletados pela instrumentação nas residências monitoradas, o consumo percentual dos aparelhos monitorados relativo ao consumo total da residência e os consumos *per capita* médios, que foram obtidos dos resultados das planilhas de monitoramento no estudo realizado por Barreto (2008).

A Figura 3.5 apresenta os consumos horários desagregados e sintetiza os consumos médios ocorridos durante um dia inteiro em uma residência com 3 habitantes. O consumo médio horário de cada aparelho é representado por uma cor, de acordo com a legenda apresentada abaixo do gráfico.

Figura 3.5: Consumo horário desagregado por pontos de utilização.



Adaptado de: (BARRETO, 2008)

Utilizando os dados coletados e analisados por Barreto (2008) como base, foi criado um sistema capaz de simular o consumo médio de uma residência durante o período de 24 horas (ou um dia). A necessidade de se criar um sistema para simular o comportamento de consumo em uma residência decorre do fato da inconveniência de se criar falhas (vazamentos, no caso deste estudo) em um sistema real, além da facilitação do estudo. A partir do consumo simulado, gerou-se dados que foram utilizados para o teste e validação do sistema de detecção e monitoramento desenvolvido neste trabalho.

### **3.3 Considerações finais de instalações prediais de água fria**

Neste capítulo foram apresentados conceitos básicos, que são necessários para o desenvolvimento deste trabalho sobre instalações prediais de água fria. Partes destes conceitos foram baseados em normas estabelecidas pela ABNT através da NBR 5626. Além disto, foram apresentados alguns estudos sobre o perfil de consumo da água e seus usos finais, estudos estes necessários para a implementação de um simulador.

O sistema de detecção e monitoramento abordado neste trabalho, como já mencionado anteriormente, possui características semelhantes às de um sistema especialista. Por este motivo, faz-se necessária uma breve explanação sobre tal assunto, como será vista no capítulo a seguir.

---

## Capítulo 4

# Sistemas Especialistas

---

Os pressupostos da IA estiveram com o ser humano sempre que este imaginou que seria capaz de controlar os seres, bem como o próprio meio. No entanto, o surgimento deste ramo da computação, de forma clássica, pode ser observado de uma maneira melhor a partir da década de 70. Nesta década observa-se a produção dos primeiros Sistemas Especialistas de renome, fruto dos pesquisadores da IA que tinham como propósito o desenvolvimento de uma máquina inteligente que fosse amplamente capaz na resolução de problemas. O propósito de que os computadores pensassem a exemplo do que fazem os seres humanos quando da resolução de problemas norteava o estudo para produção desta ferramenta (VICTOR, 2005).

A Inteligência Artificial (IA) busca prover máquinas com a capacidade de realizar algumas atividades mentais do ser humano. As atividades realizadas por essas máquinas podem envolver a sensopercepção (como tato, audição e visão), e as capacidades intelectuais (como aprendizado de conceitos e de juízos, raciocínio dedutivo e memória), a linguagem (como as verbais e gráficas) e atenção (decisão no sentido de concentrar as atividades sobre um determinado estímulo) (NASCIMENTO; YONEYAMA, 2000).

A área da IA é bastante ampla e pode ser subdividida em grupos menores. Entre as ferramentas mais utilizadas para este campo, Nascimento e Yoneyama (2000) cita três: Sistemas de produção, Lógica Nebulosa (Lógica *Fuzzy*) e as Redes Neurais Artificiais (RNAs).

Sistemas especialistas são concebidos para atuarem como consultores altamente qualificados, em uma determinada área do conhecimento. Devem, portanto, fornecer diagnósticos, condutas, sugestões ou outras informações úteis, obtidas a partir de dados fornecidos localmente e de conhecimentos armazenados previamente (NASCIMENTO; YONEYAMA, 2000).

São vários os motivos para se colocar em uso sistemas especialistas. Entretanto, de um modo geral, sempre que um problema não puder ser facilmente modelado ou sua solução conduza a um custo de processamento muito elevado, o uso de sistemas especialistas pode ser uma saída, pois possuem, na maioria das vezes, seu mecanismo baseado em processos heurísticos e conduzem às soluções de maneira mais rápida.

Ainda segundo Nascimento e Yoneyama (2000), um sistema especialista pode ser utilizado para auxiliar médicos, operadores de máquinas ou clientes de uma loja. Pode também ser empregado em sistemas de ensino assistido por computador. Enfim, sistemas especialistas permitem que conhecimentos possam ser disseminados e utilizados por um

grande número de pessoas, sem a necessidade da presença do especialista. Permite, ainda, que conhecimentos de vários especialistas possam ser amalgamados em uma só base de dados.

Sistemas especialistas podem ser definidos como ferramentas computacionais que modelam o raciocínio e as ações de um humano ou grupo especialista em uma determinada área de conhecimento. Desse modo, sistemas especialistas, assim como humanos especialistas, agem de acordo com seu domínio em um conhecimento específico (FLORES, 2003 apud SOUZA et al., 2012).

## 4.1 Classificação de sistemas especialistas

Fávero e Santos (2014) e (WATERMAN, 1986 apud VICTOR, 2005) classificam os sistemas especialistas quanto aos tipos de sistemas que os mesmos trabalham. De um modo geral, estas categorias são:

**Interpretação:** A partir de uma base de dados (conhecimento prévio), são sistemas capazes de prover soluções para determinados tipos de problemas, comparando os dados da situação atual com os dados obtidos anteriormente. Desta forma, oferecem soluções mais adequadas para o problema apresentado e descartam as soluções mais inconsistentes;

**Diagnósticos:** Geralmente estão ligados aos sistemas de interpretação e servem como sistemas de apoio detectando falhas de interpretação ou, até mesmo falhas de diagnóstico. A partir da resposta julgada como a mais correta, estes sistemas efetuam uma correção na base de dados dos sistemas especialistas;

**Monitoramento:** São sistemas que, a partir de dados recebidos pelos sensores, monitoram determinado comportamento em limites preestabelecidos, informando ao usuário humano as intervenções necessárias que podem ser tomadas;

**Predição:** Estes sistemas são capazes de prever informações futuras, tais como índices de possíveis erros e áreas de possíveis falhas, a partir de dados anteriores. Possuem mecanismos para verificar os vários futuros possíveis fazendo uso de raciocínios hipotéticos e verificando as tendências de acordo com a variação dos dados de entrada. Este sistema apenas informa ao usuário humano possíveis problemas futuros, sem causar alteração alguma no sistema;

**Planejamento:** São sistemas que, baseando-se em dados obtidos pelos sistemas especialistas de predição e nos dados de possíveis metas definidas para os próximos períodos de análise, fornecem uma lista de rotinas e sub-rotinas para atingir determinado objetivo. Em caso de etapas conflitantes, estes definem as prioridades. O princípio de funcionamento, em alguns casos, é por tentativas de soluções. Estes sistemas enfocam os aspectos mais importantes e particionam, de maneira coerente, um problema em subproblemas menos complexos, estabelecendo uma relação entre as metas destes subproblemas e a meta principal;

**Projeto:** Estes sistemas buscam soluções alternativas a problemas encontrados pelos sistemas especialistas de planejamento, oferecendo alternativas com o mínimo de alterações no resultado final buscado pelos sistemas especialistas de planejamento.

É um sistema capaz de justificar a alternativa tomada para o projeto final e de fazer uso dessa justificativa para alternativas futuras;

**Depuração:** São sistemas especialistas que possuem um mecanismo capaz de prover soluções para possíveis mau funcionamentos causados por distorções nas bases de dados ou por procedimentos danosos ao sistema;

**Reparo:** Estes sistemas desenvolvem e executam planos para administrar os reparos verificados na etapa de diagnóstico. Um sistema especialista para reparos segue um plano para administrar uma solução encontrada em uma etapa do diagnóstico. São poucos os sistemas desenvolvidos, pois o ato de executar um conserto em algo do mundo real, muitas vezes, é uma tarefa muito complexa para uma máquina;

**Instrução:** Os sistemas de instrução possuem mecanismos que verificam e corrigem o comportamento do aprendizado de estudantes. Normalmente, incorporam como subsistemas um sistema de diagnóstico e de reparo, além de tomarem por base uma descrição hipotética do conhecimento do aluno. Seu funcionamento consiste em ir interagindo com o treinando, em alguns casos apresentando uma pequena explicação e, a partir disso, sugerindo situações para serem analisadas pelo treinando;

**Controle:** São sistemas que governam o comportamento geral de outros sistemas. São os mais completos, de um modo geral, pois devem interpretar os fatos de uma situação atual, verificando os dados passados e fazendo uma predição do futuro. Apresentam os diagnósticos de possíveis problemas, formulando um plano ótimo para sua correção. Este plano de correção é executado e monitorado para que o objetivo seja alcançado.

## 4.2 Arquitetura de um sistema especialista

A arquitetura típica de um sistema especialista é composta de três componentes principais: a base de conhecimento, o motor de inferência e a interface de usuário (SOUZA et al., 2012). A Figura 4.1 representa esta arquitetura.

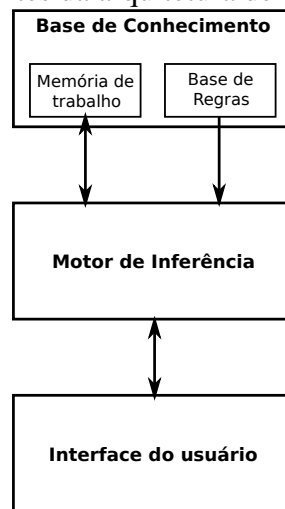
Souza et al. (2012) e Victor (2005) descrevem os componentes da Figura 4.1 da seguinte maneira:

### 4.2.1 Base de conhecimento

Composta pela memória de trabalho e pelo conjunto de regras, é o módulo do sistema que contém o conhecimento do especialista representado na forma computacional. É o conjunto de conhecimentos necessários para resolver um problema específico. Esse conhecimento é extraído a partir de fatos, heurísticas e relações que normalmente foram formalizadas por especialistas em um determinado domínio. O conhecimento pode ser representado utilizando-se uma gama de técnicas, como as redes semânticas e a lógica predicativa, porém a mais comumente utilizada é a conhecida como regras de produção.

Dentre os métodos de representação de conhecimento, pode-se citar o método baseado em regras de produção. Os sistemas de produção são aqueles que utilizam conjuntos de regras, usualmente do tipo "Se (condição) Então (ação ou conclusão)", aliado a uma base

Figura 4.1: Componentes da arquitetura de um sistema especialista.



Fonte: Elaborado pelo autor

de dados (de conhecimentos) e mecanismos de controle (NASCIMENTO; YONEYAMA, 2000).

Segundo Souza et al. (2012), nos sistemas baseados em regras, a base de conhecimento é subdividida em dois módulos: a base de regras e memória de trabalho (ou base de fatos).

### Memória de trabalho

Este módulo está inerentemente associado ao método de representação do conhecimento do especialista. Neste, são representadas computacionalmente as diversas informações que são utilizáveis no processamento para o estabelecimento de conclusões, da forma como são utilizadas por um especialista na resolução de problemas. Em sistemas que não usam regras de produção para representação do conhecimento, esta parte é composta por *Frames*, Redes Semânticas ou outras técnicas (VICTOR, 2005).

A memória de trabalho é o elemento que armazena o conhecimento concreto, ou seja, o conhecimento que pode ser considerado fato antes do processo de inferência. Esta base contém todas as informações sobre o problema que são fornecidas pelo usuário ou por outra fonte de informação. A memória de trabalho possui caráter transitório, pois, novos fatos estão sendo acrescentados continuamente ou fatos existentes são apagados (SOUZA et al., 2012).

### Base de regras

A base de regras é responsável por armazenar o conhecimento abstrato, ou seja, o conjunto de regras de produção previamente elaboradas por um especialista. Esta base, ao contrário da memória de trabalho, geralmente possui um caráter mais permanente, ou seja, este conjunto de regras não é alterado pelo sistema ou pelo usuário final (SOUZA et al., 2012).

### **4.2.2 Motor de inferência**

É um elemento essencial para a existência de um sistema especialista. Ele é considerado o núcleo do sistema, uma vez que é por intermédio dele que os fatos, heurísticas e relações que compõem a base de conhecimento são aplicados no processo de resolução do problema. Este associa o conhecimento abstrato contido na base de regras com o conhecimento concreto armazenado na base de fatos, inferindo conclusões e gerando novos fatos (SOUZA et al., 2012).

O motor, ou máquina de inferência, como aparece em algumas literaturas, é o módulo responsável pelo processamento no sistema. Neste módulo é feita a interação entre os fatos contidos na memória de trabalho e o conjunto de regras para estabelecimento das conclusões (VICTOR, 2005).

### **4.2.3 Interface do usuário**

É o módulo responsável pela comunicação entre o usuário e o sistema. Através deste, o usuário tem acesso a visualização de diagnósticos, avisos, gráficos, entre outros. É também neste módulo que o usuário insere dados ou muda configurações no sistema.

O sistema proposto neste trabalho se assemelha com um sistema especialista baseado em regras de produção em vários aspectos, porém, como será visto no Capítulo 6, o sistema aqui apresentado não necessita de um motor de inferência para resolver o problema apresentado neste trabalho.

## **4.3 Considerações finais sobre sistemas especialistas**

Neste capítulo foram mostrados conceitos básicos, tais como classificação e arquitetura, sobre sistemas especialistas. Tais conceitos são necessários para auxiliar na descrição do sistema proposto neste trabalho, mesmo este não sendo um sistema especialista.

Assim como foi necessário fazer uma breve explanação sobre sistemas especialistas, também faz-se necessário apresentar uma curta explicação sobre falhas, de forma que o trabalho proposto tende a detectar vazamentos, os quais podem ser considerados falhas em sistemas de distribuição e armazenamento de água.

---

# Capítulo 5

## Falhas

---

Segundo Isermann (2006, *apud* Rebouças, 2011) com a demanda cada vez mais crescente com relação a eficiência, a qualidade dos produtos e a integração dos processos no setor industrial, aliada aos altos custos envolvidos e as mais diversas necessidades de segurança, torna-se evidente a importância dos sistemas de supervisão e dos sistemas de Detecção e Diagnóstico de Falhas (DDF).

Os desafios desse segmento estão, portanto, em se utilizar modelos matemáticos do processo, modelos de sinais, métodos de identificação e estimação e técnicas de inteligência artificial para se desenvolver um sistema capaz de detectar e diagnosticar falhas em um processo. Para se desenvolver esses tipos de sistemas, deve-se levar em consideração diversos aspectos, destacando-se: a detecção antecipada de pequenas falhas (abruptas ou incipientes); o diagnóstico de falhas nos sensores, atuadores e componentes de um processo; o supervisionamento de estados transientes; o reparo e a manutenção baseados no comportamento do processo; o rigoroso controle de qualidade em processos de fabricação; a detecção e diagnóstico de falhas remotas; o suporte para gerenciamento de falhas e o suporte para sistemas tolerantes a falhas e sistemas reconfiguráveis (REBOUÇAS, 2011).

Gertler (1998) afirma que as falhas são desvios do comportamento normal na planta ou nos seus instrumentos. Quanto ao desvio no comportamento normal ele faz a seguinte classificação:

**Processos de falhas aditivos:** Estas são entradas desconhecidas que, quando presentes, causam uma mudança no sinal de saída das plantas independentemente das entradas conhecidas. Exemplos destas falhas são: Vazamentos, carregamentos, entre outras;

**Processos de falhas multiplicativos:** Estas são mudanças (abruptas ou graduais) em alguns parâmetros da planta. Elas causam mudanças no sinal de saída da planta que dependem da magnitude dos sinais de entrada. Alguns exemplos deste tipo de falha são: A deterioração do equipamento, perda total ou parcial da potência, entre outras;

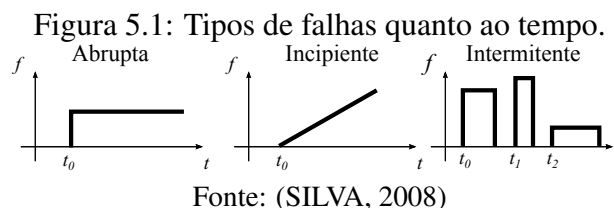
Quanto ao instrumento onde ocorre a falha, Gertler (1998) classifica em:

**Falha nos sensores:** Este tipo de falha ocorre quando há discrepância entre o valor medido e o valor real das variáveis individuais da planta. Estas falhas geralmente

são consideradas aditivas (independem da magnitude da medição), embora algumas falhas possam ser melhor caracterizadas como multiplicativas;

**Falha nos atuadores:** Estas falhas ocorrem na presença de uma certa discrepância entre o comando de entrada de um atuador e o valor real da saída dele. Geralmente são aditivas, mas alguns casos podem ser classificados como multiplicativas.

De acordo com Silva (2008, *apud* Rebouças, 2011) as falhas, quanto ao tempo, podem ser classificadas como abruptas, incipientes ou intermitentes, como mostra a Figura 5.1.



**Falhas abruptas:** Surgem repentinamente, podendo ser decorrentes de imprevistos ou até mesmo de acidentes. Essas falhas mudam o comportamento do processo rapidamente, exigindo contra-ações velozes e eficazes que possam minimizar as consequências do ocorrido.

**Falhas incipientes:** Iniciam a partir de pequenos desvios comportamentais do sistema, podendo ser mascaradas pelos controladores. Muitas vezes essas falhas acabam passando despercebidas pelos operadores ou até mesmo pelos sistemas de detecção e diagnóstico de falhas.

**Falhas intermitentes:** São aquelas que ocorrem durante um certo período de tempo e, em seguida, desaparecem, voltando a aparecer após um novo intervalo. Podem ser causadas por alguma perturbação periódica ou por alguma situação que se repita ciclicamente.

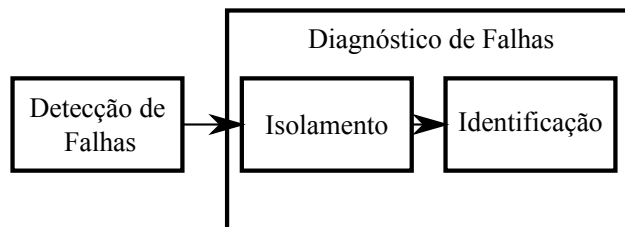
As falhas são normalmente difíceis de prever e de prevenir. A ausência de sistemas de supervisão e diagnóstico de falhas pode fazer com que uma falha pequena progrida para uma avaria do processo, originando situações de pequenas perdas financeiras até enormes perdas humanas, ambientais e econômicas.

## 5.1 Detecção e diagnóstico de falhas

Gertler (1998) afirma que os sistemas de detecção e diagnóstico de falhas devem ser capazes de efetuar as seguintes tarefas:

- Detecção de falhas, que indica quando alguma falha surge no sistema;
- Isolamento da falha, que determina a exata localização da falha;
- Identificação da falha, que determina a magnitude da falha.

Figura 5.2: Diagrama do processo de detecção e diagnóstico de falhas.



Fonte: Elaborado pelo autor

O isolamento e a identificação fazem parte do diagnóstico de falhas. A Figura 5.2 mostra um diagrama do processo de identificação e diagnóstico.

Isermann (2006, *apud* Rebouças, 2011) faz uma análise de alguns métodos de detecção de falhas, como segue abaixo:

**Detecção de falhas com verificação de limites:** É um método relativamente simples e intuitivo que se baseia na medição direta de uma determinada variável e a comparação de seu valor absoluto (Equação 5.1) ou de sua tendência (Equação 5.2) com valores limites pré-estabelecidos.

$$Y_{min} < Y < Y_{max} \quad (5.1)$$

$$\dot{Y}_{min} < \dot{Y} < \dot{Y}_{max} \quad (5.2)$$

Essa abordagem considera que o processo está funcionando normalmente quando a variável monitorada encontra-se dentro de uma zona de tolerância. Quando a variável monitorada excede um dos limiares estabelecidos, deduz-se que haverá uma falha em algum ponto do processo. Por mais simples que pareça, este método é aplicado na maioria dos sistemas de automação.

**Detecção de falhas com modelos de sinais:** É um método baseado em certas características do sinal medido, tais como amplitude, fase, espectro de frequências e outras, que são calculadas a partir de modelos matemáticos do sinal e comparadas com as características observadas durante o funcionamento normal. As diferenças comportamentais geradas pela comparação são utilizadas para realizar a detecção das falhas.

**Detecção de falhas com equações de paridade:** É um método direto que baseia-se na comparação do comportamento real com o comportamento analítico. A diferença entre os sinais de saída do processo real e os sinais de saída do modelo matemático que descreve sua dinâmica geram os resíduos utilizados para detecção da falha. Apesar da capacidade em indicar anormalidades no processo através das discrepâncias, essa abordagem possui a desvantagem de ser necessário ter o conhecimento prévio das equações que regem a dinâmica do processo.

**Detecção com observadores e estimadores de estado:** Utiliza observadores de

estado, estes utilizam o erro de saída, dado pela diferença entre a medição da variável no processo e o modelo ajustável. Assume-se que, assim como no caso das abordagens que utilizam equações de paridade, a estrutura e os parâmetros do modelo precisam ser conhecidos.

Os três tipos de falhas presentes em sistemas de distribuição e armazenamento de água em residências abordados neste trabalho são:

- Vazamentos presentes antes do reservatório (alimentação da residência), sejam eles causados por rupturas na tubulação ou dispositivos abertos;
- Vazamentos presentes no reservatório, que podem ser causados por rupturas nas paredes do tanque;
- E, finalmente, vazamentos presentes nos dispositivos finais ou na tubulação após o reservatório.

Estes erros são gerados no próprio algoritmo de simulação de consumo, visto que se torna inviável causar este tipo de comportamento em sistemas reais, sendo esta uma justificativa do uso de um simulador. As falhas simuladas, para simplificação do desenvolvimento do simulador, serão consideradas como abruptas e aditivas, como será visto no Capítulo 6.

## 5.2 Considerações finais sobre falhas

Este capítulo mostrou algumas considerações básicas sobre falhas, mesmo isto não sendo o foco deste trabalho. Porém, tais considerações são necessárias para a caracterização dos tipos de vazamentos aqui abordados.

No próximo capítulo será apresentado o sistema proposto neste trabalho, assim como os cálculos e preposições utilizadas para o desenvolvimento, tanto do sistema de detecção, quanto do simulador utilizado para testes e validação do sistema.

---

# Capítulo 6

## Sistema proposto

---

Um modelo matemático de um sistema dinâmico é definido como um conjunto de equações que representa a dinâmica do sistema (OGATA, 2011). Tais equações são obtidas através do uso das leis e princípios físicos envolvidas nos processos ou a partir de métodos experimentais. Mas nem sempre é possível a obtenção de uma modelagem exata do processo. Nesses casos, faz-se uso de aproximações, que devem ser suficientes para a realização do trabalho.

No trabalho aqui proposto, o sistema pode ser representado por um esquema fluídico constituído pela tubulação e por um reservatório responsável pelo armazenamento da água. Em condições ideais, a água proveniente da concessionária pode ser considerada a vazão de entrada no tanque, assim como o consumo a vazão de saída do mesmo.

Sendo assim, seguindo as argumentações expostas em Dorf e Bishop (2009) e em Rebouças (2011) admite-se que:

- A água é incompressível, ou seja, possui massa específica constante, já que o fator de compressibilidade da água é de  $k_{(h_2o)} = 4,9 \times 10^{-10} m^2/N$ ;
- O escoamento é não viscoso;
- Os efeitos de atrito são desprezíveis;
- O fluxo é não-rotacional, sendo assim, cada elemento do fluido em cada ponto do escoamento não tem velocidade angular com relação a esse ponto;

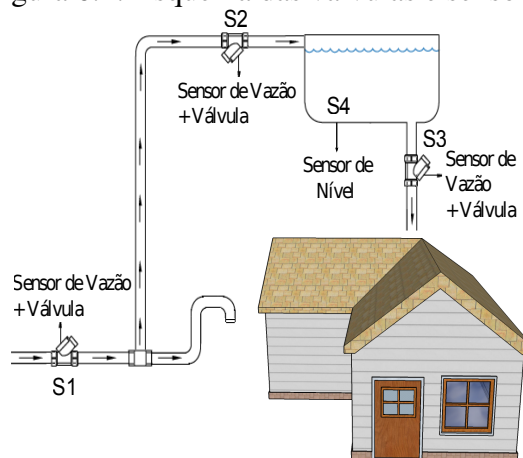
A alimentação do reservatório de água é feita por uma tubulação, cuja vazão é controlada por uma boia (válvula) que possui relação inversa com o nível de água no reservatório. A saída de água é feita por outra tubulação que alimenta os aparelhos.

O sistema de sensores e válvulas utilizado para este trabalho pode ser observado na Figura 6.1. A partir desse sistema, são medidas as variáveis de interesse para este trabalho, que são:

- A vazão de entrada no sistema de distribuição do prédio ( $L/s$ );
- A vazão de entrada no tanque de armazenamento ( $L/s$ );
- A vazão de consumo ( $L/s$ );
- A altura do nível da água no tanque ( $m$ ).

A Figura 6.1 simplifica o sistema proposto, já que o mesmo pode ser instalado em um edifício. Para isto, é necessária a instalação de sensores e válvulas na alimentação de água

Figura 6.1: Esquema das válvulas e sensores.



Fonte: Elaborado pelo autor

de cada apartamento. Nesta figura são mostrados os sensores e atuadores considerados neste trabalho, onde:

- S1: representa a válvula e o atuador instalados junto ao registro da concessionária;
- S2: representa a válvula e o atuador instalados antes do reservatório de água;
- S3: representa a válvula e o atuador instalados depois do reservatório de água;
- S4: representa o sensor de nível instalado no reservatório;

## 6.1 Simulador

Como citado anteriormente, produzir falhas em sistemas reais é uma tarefa inconveniente, por isto, tem-se a necessidade do uso de um simulador. No caso do sistema abordado neste trabalho, foi criado um sistema capaz de simular o consumo em uma residência, assim como suas possíveis falhas.

Com o propósito de calcular o nível de água no tanque (tanto para ser utilizado no simulador, quanto no sistema de detecção, como será visto adiante), fez-se uso da Equação 6.1, desenvolvida a partir do cálculo da vazão volumétrica ( $\Delta Q = dV/dt$ ), que pode ser desmembrada em uma diferença entre o fluxo de entrada e saída, denominada balanço de volume (COELHO; COELHO, 2004 apud FONSECA, 2012).

$$\frac{dV}{dt} = \Delta Q \Rightarrow A \frac{dh}{dt} = q_{in} - q_{out} \Rightarrow \dot{h} = \frac{q_{in} - q_{out}}{A} \quad (6.1)$$

Onde:

- $V$ : é o volume de líquido no tanque;
- $\frac{dV}{dt}$ : é a derivada do volume de líquido no tanque em relação ao tempo  $t$ ;
- $\Delta Q$ : é a diferença entre a vazão de entrada e a vazão de saída;
- $h$ : é a altura do nível da água no tanque;

$\dot{h}$ : é a variação da altura do nível da água no tanque em função do tempo  $t$ ;

$A$ : é a área transversal do tanque;

$q_{in}$ : é a vazão de entrada;

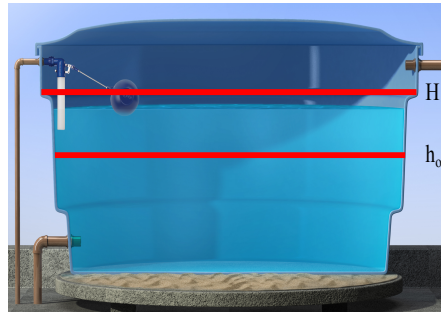
$q_{out}$ : é a vazão de saída;

Outra consideração importante a ser feita é a atuação de uma válvula controlada pela boia. Neste caso, a mesma se comporta como um valor de admitância em relação a vazão de alimentação. Quando a válvula está totalmente aberta, a vazão de entrada é igual a vazão máxima, que varia de acordo com a vazão na alimentação vinda da concessionária de água. Quando a válvula está fechada, a vazão de alimentação do reservatório é igual à zero, independentemente do valor da vazão na alimentação. A equação 6.2 mostra essa relação, onde  $q_{in_{res}}$  é a vazão de entrada no reservatório influenciada pela válvula.

$$q_{in_{res}} = q_{in} \times R \quad (6.2)$$

O valor de  $R$  é calculado considerando-se que a boia só opera em uma região que varia da sua altura inicial de operação  $h_{op}$  até a altura máxima  $H$  (Conforme Figura 6.2) e representada pelo gráfico da Figura 6.3, onde o comportamento é aproximado por uma relação linear por partes.

Figura 6.2: Válvula na alimentação de um reservatório de água para controle de nível.



Fonte: Elaborado pelo autor

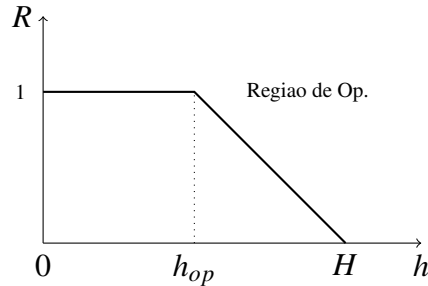
O gráfico da Figura 6.3 é representado pelas seguintes relações:

- $R = 1$ , quando  $0 < h < h_{op}$ ;
- $R = \frac{h-H}{h_{op}-H}$ , quando  $h_{op} < h < H$ ;
- $R = 0$ , quando  $h_{op} \geq H$ ;

A vazão de abastecimento da residência ou prédio ( $q_{alim}$ ), proveniente da concessionária responsável, neste trabalho, é considerado como um valor não constante e estocástico, dado pela relação apresentada na Equação 6.3.

$$q_{alim} = q_{medio} + var \quad (6.3)$$

Figura 6.3: Gráfico da aproximação do comportamento da boia em um reservatório.



Fonte: Elaborado pelo autor

Onde  $q_{medio}$  é a vazão média proveniente da concessionária e  $Var$  é o valor da variação. Desta forma, o valor da vazão de entrada de água no reservatório é dada pela Equação 6.4.

$$q_{in} = q_{alim} - q_{con\_out} \quad (6.4)$$

Onde  $q_{con\_out}$  é o consumo externo, ou seja, dispositivos que são abastecidos diretamente pela água proveniente da concessionária de água. Por causa disto, este sistema é caracterizado como um sistema predial de distribuição misto, como citado no Capítulo 3. Acrescentando à Equação 6.4 o efeito de um vazamento localizado antes do reservatório ( $q_{v1}$ ), chega-se a expressão mostrada na Equação 6.5.

$$q_{in} = q_{alim} - q_{con\_out} - q_{v1} \quad (6.5)$$

Para o cálculo do nível de água, mostrado na Equação 6.1, levando em consideração as falhas e o comportamento da válvula (boia) na alimentação do reservatório de água, a equação de balanço de massa fica sendo calculada conforme mostra a Equação 6.6:

$$\dot{h} = \frac{R \times q_{in} - q_{con\_in} - q_{v2}}{A} \quad (6.6)$$

Onde  $q_{con\_in}$  é o consumo de água interno na residência ou prédio, ou seja, a vazão de saída no reservatório de água e  $q_{v2}$  é o valor de um possível vazamento na estrutura do reservatório de água. Este consumo será melhor detalhado no próximo tópico.

Já para um vazamento dentro da residência ou prédio ( $q_{v3}$ ), leva-se em consideração a Equação 6.7:

$$q_{con\_in} = q_{con\_in}(real) + q_{v3} \quad (6.7)$$

Desta forma, a equação de balanço de massa fica de acordo com a Equação :

$$\dot{h} = \frac{R \times (q_{alim} - q_{con\_out} - q_{v1}) - (q_{con\_in}(real) + q_{v3}) - q_{v2}}{A} \quad (6.8)$$

Como citado no Capítulo 3, para a modelagem do consumo em uma residência, foram utilizados os dados obtidos por Barreto (2008) em seu trabalho. Tal modelo de consumo

não altera em nada o comportamento do sistema detector, já que este pode ser utilizado para outros comportamento de consumo, porém, serve como exemplo para aplicabilidade do sistema.

Para a geração do consumo, foram feitas as seguintes considerações:

- O simulador gera um valor de consumo de água a cada minuto para cada tipo de dispositivo (no caso deste trabalho, para simplificação, foram considerados apenas quatro dispositivos: torneiras, descargas de bacias sanitárias, chuveiros e máquinas de lavar roupa);
- A quantidade de dispositivos em uma residência não influencia no consumo total, ao contrário da quantidade de habitantes.
- Para cada hora, segundo os dados da Figura 3.5, cada tipo de dispositivo possui um comportamento diferente.

Além das considerações feitas anteriormente, foi necessário o conhecimento do comportamento de cada dispositivo durante o seu acionamento. A Tabela 6.1 mostra os valores característicos de alguns aparelhos obtidos a partir de medições feitas.

Tabela 6.1: Medição de consumo em aparelhos sanitários

<b>Aparelho sanitário</b>	<b>Duração de uso (s)</b>	<b>Intervalo entre usos (min)</b>	<b>Volume (L)</b>	<b>Vazão(L/s)</b>
Bacia sanitária com válvula de descarga	6,15	35,66	7,90	1,24
Bacia sanitária com caixa acoplada	78,32	56,77	5,87	0,06
Torneira comum de lavatório	20,40	23,17	1,38	0,08
Torneira de acionamento hidromecânico	8,86	9,24	0,72	0,07
Torneira de acionamento fotoelétrico	3,93	10,63	0,42	0,05

Fonte: (BARRETO, 2008)

Além destes, outros dados que devem ser inseridos são:

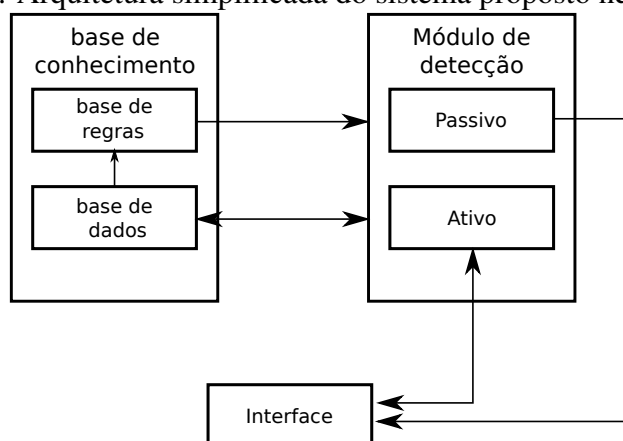
- Valor médio da vazão de entrada da rede de distribuição pública na residência;
- Dimensões do reservatório de água;
- Nível inicial de água no reservatório;
- Alturas de operação da válvula com boia no reservatório.

O simulador também configura os valores das falhas (vazamentos) que podem vir a aparecer no sistema. Tais falhas, para nível de simplificação, são consideradas do tipo abruptas e aditivas, como já citado no Capítulo 5. A partir dos valores mencionados, o simulador é capaz de gerar dados de consumo de uma residência virtual, assim como seus possíveis vazamentos, e alimentar o sistema de detecção.

## 6.2 Sistema de Detecção

Para fazer a detecção e identificação dos vazamentos (dentre as três possibilidades aqui abordadas), foi utilizado um sistema composto por dois módulos: Um módulo passivo e outro módulo ativo. O sistema utiliza uma base de conhecimento composta por uma base de regras simples do tipo SE (CONDIÇÃO) - ENTÃO (AÇÃO), semelhantes aos sistemas especialistas baseados em regras, e por um banco de dados, onde ficam armazenados os valores de consumo que são utilizados como referência para o sistema de detecção. A Figura 6.4 ilustra a arquitetura do sistema.

Figura 6.4: Arquitetura simplificada do sistema proposto neste trabalho.



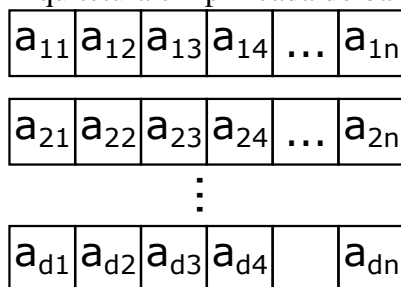
Fonte: Elaborado pelo autor

A base de regras é o conjunto de sentenças do tipo SE (CONDIÇÕES) - ENTÃO (AÇÕES) utilizado no sistema, tanto para o módulo passivo quanto para o ativo, conforme mostram as sessões 6.2.1 e 6.2.2.

A base de dados é o conjunto de valores armazenados no sistema que são utilizados para referência. As referências são os valores medidos pelos sensores, em intervalos de 60 segundos, durante um período de 14 dias e que são armazenados no formato de vetores, conforme mostra a Figura 6.5. Estes valores só serão armazenados caso não seja detectado nenhum vazamento durante o dia em questão. O sistema renova estes valores a cada ciclo de dia completado, armazenando o novo vetor de valores na primeira posição e descartando o último.

Na Figura 6.5,  $d$  representa o número de dias que são armazenados no banco de dados e  $n$  o número de leituras efetuadas dos valores coletados pelos sensores durante o intervalo

Figura 6.5: Arquitetura simplificada do banco de dados.

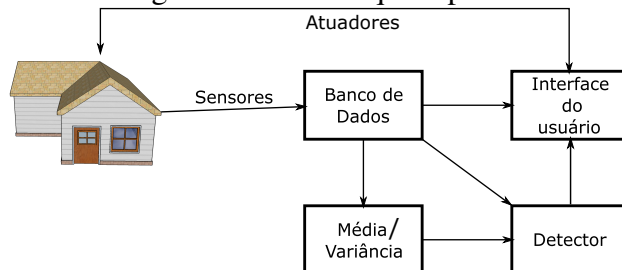


Fonte: Elaborado pelo autor

de um dia. Para o caso de as leituras serem feitas uma vez a cada minuto, o valor de  $n$  será igual a 1440.

De uma maneira mais geral, o sistema aqui proposto pode ser simplificado através do diagrama da Figura 6.6. Nesta, é possível observar que os sensores alimentam o banco de dados com as informações colhidas. A partir dos dados do banco de dados, são calculadas informações, tais como média e desvio padrão. Todos esses dados alimentam o sistema detector. A partir da interface criada, o usuário tem acesso ao histórico de consumo e aos estados dos atuadores.

Figura 6.6: Diagrama de blocos que representa o sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor

O que diferencia este sistema de um especialista é a ausência de um motor de inferência, como já foi citado no Capítulo 4, pois, para a realização do trabalho aqui proposto, não foi necessário fazer a verificação de conflitos ou ausência de regras, atividade esta, realizada pelo mesmo.

As subseções a seguir irão detalhar cada módulo presente no sistema de detecção.

### 6.2.1 Módulo passivo

O módulo passivo consiste em uma parte do sistema que opera sem a intervenção do usuário. Este módulo faz uso somente dos dados obtidos pelo sensores e, através de um conjunto de regras, faz a detecção de possíveis vazamentos no sistema. O conjunto de regras utilizado é mostrado no Algoritmo 1:

**Algoritmo 1** Módulo Passivo

---

Ler  $Q_{alim}, Q_{in}, Q_{con\_in}, h$

SE  $\implies Q_{alim} > Q_{in}$  durante 60 medições  
 ENTÃO  $\implies$  *Vazamento antes do reservatorio detectado*

SE  $\implies Q_{con\_in} > Q_{ref}$  durante 60 medições  
 ENTÃO  $\implies$  *Vazamento depois do reservatorio detectado*

SE  $\implies \dot{h}_{teste} = 1.3 \times \dot{h}$   
 ENTÃO  $\implies$  *Vazamento no reservatorio detectado*

---

Para detecção de vazamentos presentes antes do reservatório, o sistema compara os valores de  $Q_{alim}$  e  $Q_{in}$ . Em condições normais de operação, ou seja, sem a presença de vazamentos nesta área do sistema, o valor de  $Q_{alim}$  deve ser igual ao valor de  $Q_{in}$ . Caso o sistema detecte que o valor de  $Q_{alim}$  seja maior que o valor de  $Q_{in}$ , ele incrementa um *buffer* de verificação. Caso isto ocorra 60 vezes (este valor representa um tempo de espera de uma hora, para casos de ruído nos sensores ou consumo em aparelhos externos), o sistema alerta o usuário sobre um possível vazamento antes do reservatório. Vale ressaltar que o usuário pode estar utilizando um aparelho externo por um período igual ou maior que uma hora, neste caso, o sistema acusará um falso positivo, mas, mesmo este falso alarme será útil para indicar ao usuário um consumo excessivo de água.

$Q_{ref}$  é o valor de referência do sensor de vazão inserido após o reservatório.  $\dot{h}_{teste}$  é o valor da altura estimada, calculada pelo sistema de detecção a partir dos valores da vazão de entrada no reservatório e da vazão de saída. No caso de um vazamento no reservatório, o sistema detectará que a altura medida pelo sensor de nível será menor que a altura estimada. No caso do valor acima citado, o sistema só acusará um vazamento quando o valor de teste for 30% maior que o valor de altura medido pelo sensor de nível. Escolheu-se um valor de 30% para minimizar os efeitos causados por ruídos na rede.

Na detecção de vazamentos após o reservatório, o sistema faz uso do sensor de saída do reservatório. Caso o sensor faça 60 medições seguidas com valores acima de  $Q_{ref}$  (onde, para este caso simulado, o qual não considera valores de ruídos,  $Q_{ref} = 0$ ), o sistema acusará um possível vazamento. Assim como no caso da detecção de vazamentos antes do reservatório, o sistema indicará um falso positivo para consumos que superem o tempo de 1 hora.

Como mostrado no Algoritmo 1, este módulo não recebe dados da interface do usuário, assim como não opera as válvulas presentes no sistema. Por este motivo é chamado de Módulo Passivo. Quando detecta algum vazamento, este módulo manda um aviso para o sistema para notificar o usuário que ocorreu um provável vazamento, informando o setor e instruindo o sistema a não armazenar os valores do dia no banco de dados.

### 6.2.2 Módulo ativo

Este módulo necessita que o usuário informe qual a região do sistema ele quer que seja verificada e qual o período do dia. Dependendo da configuração fornecida pelo usuário, o sistema irá fechar um conjunto diferente de válvulas durante um período de tempo definido também pelo usuário (Ver Algoritmo 2).

---

#### Algoritmo 2 Módulo Ativo

---

Ler	Tipo de verificação
Ler	Intervalo de tempo

#### Para detecção de vazamentos antes do reservatório:

Solicitar que sejam desligados os aparelhos externos  
 Fechar válvula em S2  
 Verificar se há fluxo no sensor de vazão S1  
 SE houver fluxo  $\implies$  ENTÃO possível vazamento detectado

#### Para detecção de vazamentos no reservatório:

Fechar válvulas S2 e S3  
 Verificar se o nível de água no reservatório decresce  
 SE decresce  $\implies$  ENTÃO possível vazamento detectado

#### Para detecção de vazamentos depois do reservatório:

Solicitar que sejam desligados os aparelhos internos  
 Verificar se há fluxo no sensor de vazão S3  
 SE houver fluxo  $\implies$  ENTÃO possível vazamento detectado

---

Na detecção de vazamentos antes do reservatório de água é solicitado ao usuário que desligue todos os dispositivos externos no período pleiteado para verificação. Assim que o usuário informa ao aplicativo que já desligou os dispositivos, o sistema fecha a válvula S2. Em seguida, o sistema inicia o monitoramento do sensor de vazão S1. Caso o volume de água ultrapasse um limiar, o sistema acusará um possível vazamento na tubulação antes do reservatório.

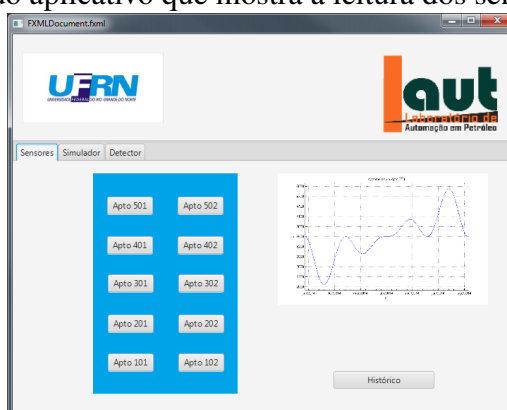
Para a detecção no reservatório, o sistema fecha as válvulas S2 e S3, isolando assim o reservatório. Se, durante o período de tempo do teste, o nível de água no reservatório decrescer, o sistema acusará um possível vazamento no reservatório.

No último tipo de detecção, o sistema solicita ao usuário que desligue todos os dispositivos internos da residência. Após a confirmação do usuário, o sistema inicia o monitoramento do sensor de vazão S3. Caso o volume de água ultrapasse um limiar, o sistema acusará um possível vazamento dentro da residência.

### 6.2.3 Aplicativo desenvolvido

O aplicativo para fazer a interface de comunicação com o usuário foi criada com base na linguagem de programação C# e foi desenvolvido na plataforma de programação Visual Studio 2010 da Microsoft®. A Figura 6.7 mostra a tela inicial do aplicativo, onde é possível verificar a leitura do sensor de fluxo para cada apartamento, além de poder ver o histórico de consumo.

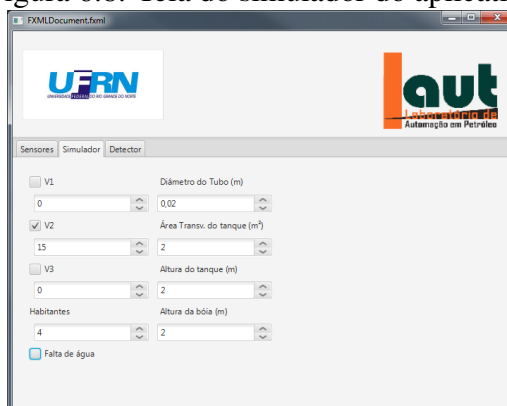
Figura 6.7: Tela do aplicativo que mostra a leitura dos sensores e o histórico.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 6.8 mostra a segunda tela do aplicativo, onde o usuário pode configurar os dados do simulador do sistema, incluindo o valor dos vazamentos.

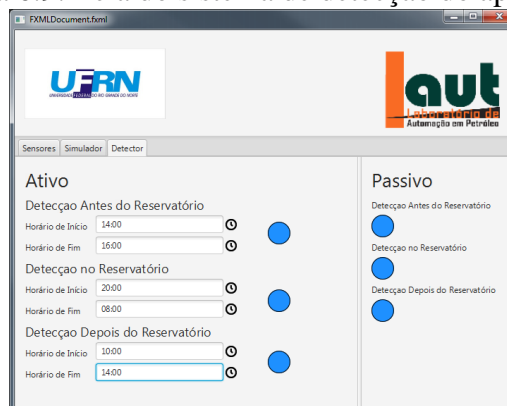
Figura 6.8: Tela do simulador do aplicativo.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 6.9 mostra a tela do aplicativo na área do detector. Esta tela é dividida em uma parte para a detecção ativa, onde o usuário pode escolher os horários que ocorrerão a detecção, e a tela para a detecção passiva, que ilustra somente os marcadores de estado do sistema.

Figura 6.9: Tela do sistema de detecção do aplicativo.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 6.3 Considerações finais sobre o sistema desenvolvido

Como mostrado neste capítulo, foi desenvolvido um sistema capaz de detectar vazamentos em prédios e residências que utiliza dois módulos distintos de operação: um módulo passivo e outro ativo. No módulo passivo o sistema faz uso dos dados obtidos pelos sensores, sem haver a necessidade de interação com o usuário. Já no módulo ativo, o sistema necessita que o usuário informe alguns dados antes de iniciar a detecção.

No próximo capítulo, serão apresentados os resultados obtidos a partir do algoritmo utilizado para detecção, assim como os resultados gerados pelo simulador de consumo, o qual foi utilizado para validar o sistema proposto neste trabalho.

---

# Capítulo 7

## Resultados

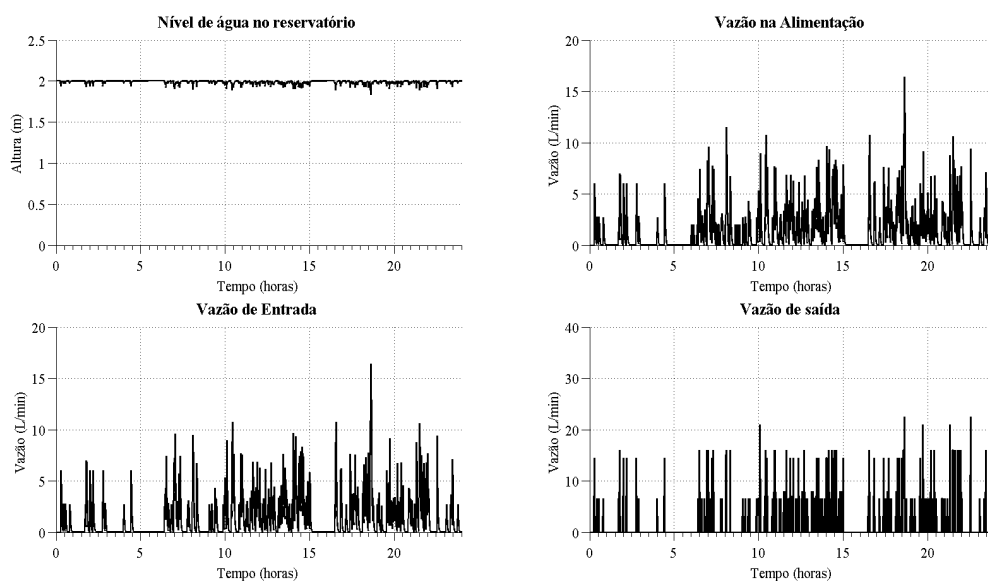
---

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos na realização do trabalho. Para uma melhor explicação, os gráficos apresentados neste capítulo foram feitos utilizando o *software* MATLAB<sup>®</sup>.

### 7.1 Resultados do simulador

Como citado anteriormente, para validação do sistema proposto neste trabalho, foi necessária a utilização de um sistema capaz de simular o comportamento do consumo de uma residência. A Figura 7.1 mostra um exemplo de valores dos sensores (de vazão e de nível) gerados e utilizados para a simulação do consumo durante um período de 24 horas. Nesta figura em específico, o sistema não apresenta nenhum tipo de vazamento.

Figura 7.1: Dados gerados pelo simulador do consumo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados aqui mostrados utilizam os seguintes dados que alimentam o simulador:

- Medidas do tanque do reservatório:  $2 \times 2 \times 2 = 8m^3$
- Número de habitantes da residência: 4
- Altura de operação da boia no reservatório:  $h_{op} = 1,7m$
- Vazão média de alimentação da residência:  $30L/min$

O simulador gera um valor para cada minuto, totalizando um vetor com 1440 elementos para cada dia. Além disto, o simulador também gera valores de vazamentos (falhas). Estes vazamentos, para o caso deste estudo, foram considerados como falhas aditivas e abruptas, como mostrado nas Equações 6.5, 6.6 e 6.7.

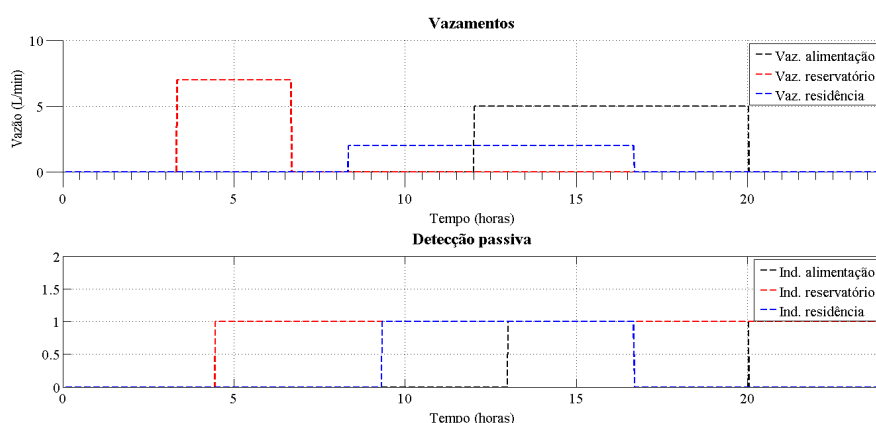
Como já discutido anteriormente, o sistema possui dois módulos de detecção: um módulo ativo e outro passivo. Cada módulo faz a detecção dos três tipos de vazamentos que são abordados neste trabalho. As seções a seguir irão mostrar os resultados para cada um dos módulos de detecção utilizados neste trabalho.

## 7.2 Resultados da detecção a partir do módulo passivo

O módulo passivo, como explicado no Capítulo 6, funciona sem a necessidade de interação com o usuário, apenas fazendo uso da leitura dos sensores instalados no sistema de água.

A Figura 7.2 ilustra o módulo passivo do sistema de uma maneira geral, apresentando na parte de cima os sinais de vazamentos e na parte de baixo, os sinais do sistema de detecção. Nela, o sistema possui a presença dos três tipos de vazamentos abordados neste trabalho, assim como os três tipos de alerta que o sistema pode emitir.

Figura 7.2: Resposta do módulo passivo para os três tipos de vazamentos.

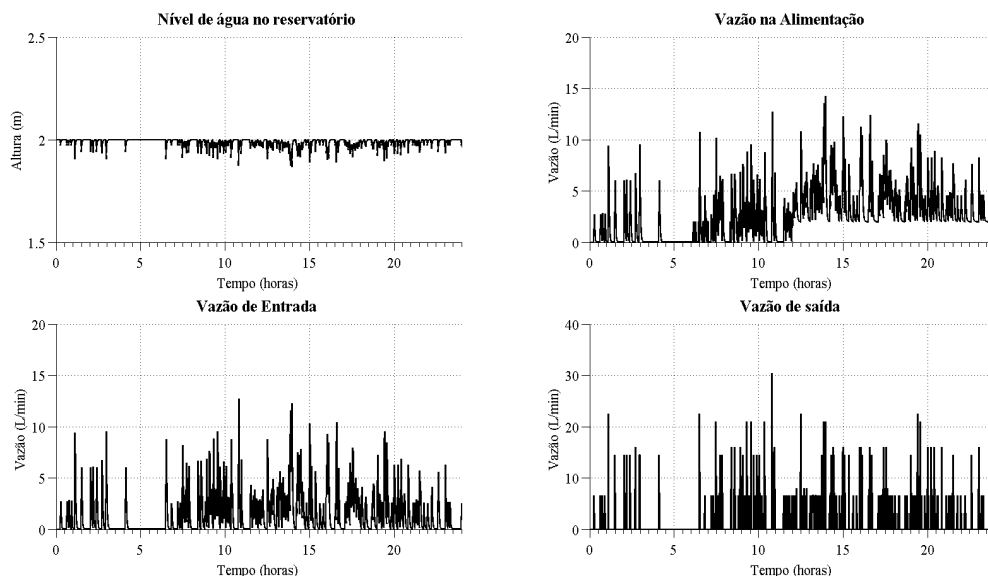


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 7.3 mostra um consumo simulado no qual está presente um vazamento antes do reservatório de água. No qual é possível observar que, ao acontecer um vazamento

antes do reservatório, o sensor de vazão na alimentação, instalado junto ao registo da concessionária (sensor *S1*, segundo a Figura 6.1), muda o comportamento, passando a ter um valor de referência acima de zero (neste caso,  $2L/min$ ).

Figura 7.3: Sistema simulado com a presença de um vazamento na alimentação.



Fonte: Elaborado pelo autor

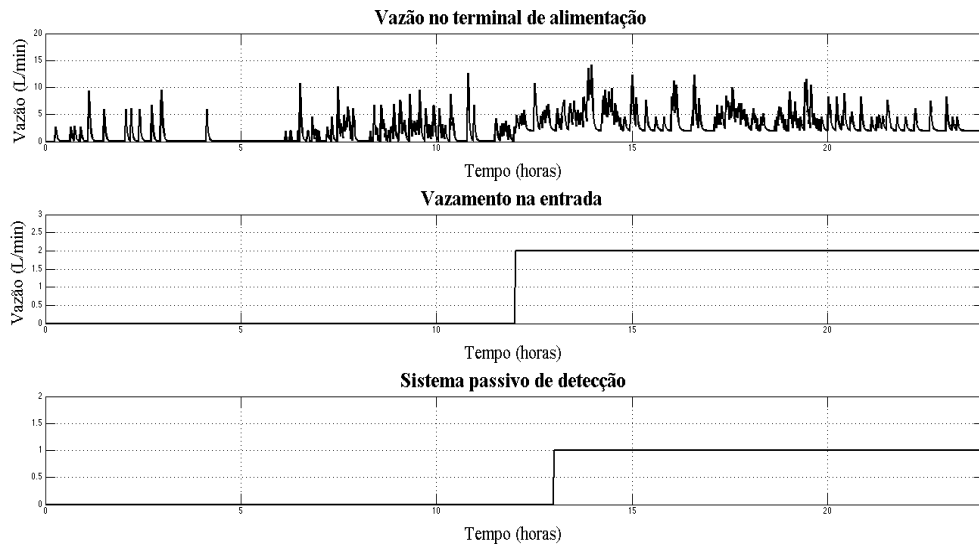
A Figura 7.4 mostra o sensor de vazão *S1*, juntamente com o sinal do vazamento e com o sinal de alerta do detector, representado por uma função degrau, onde, no nível lógico 0, o sistema não detecta nenhum vazamento, e no nível lógico 1, há uma detecção de vazamento.

Na Figura 7.5 é ilustrado um vazamento após o reservatório de água. Neste caso, o vazamento possui um início e término. É possível observar que este tipo de vazamento, por se localizar no fim do sistema de distribuição analisado neste trabalho, interfere na leitura de todos os sensores.

A Figura 7.6 mostra os sinais da vazão de saída (sensor *S3*) em destaque, assim como o sinal correspondente ao vazamento e o sinal do sistema de detecção. A partir desta figura, é possível notar que o sinal de detecção vai para o nível lógico baixo assim que o vazamento é corrigido.

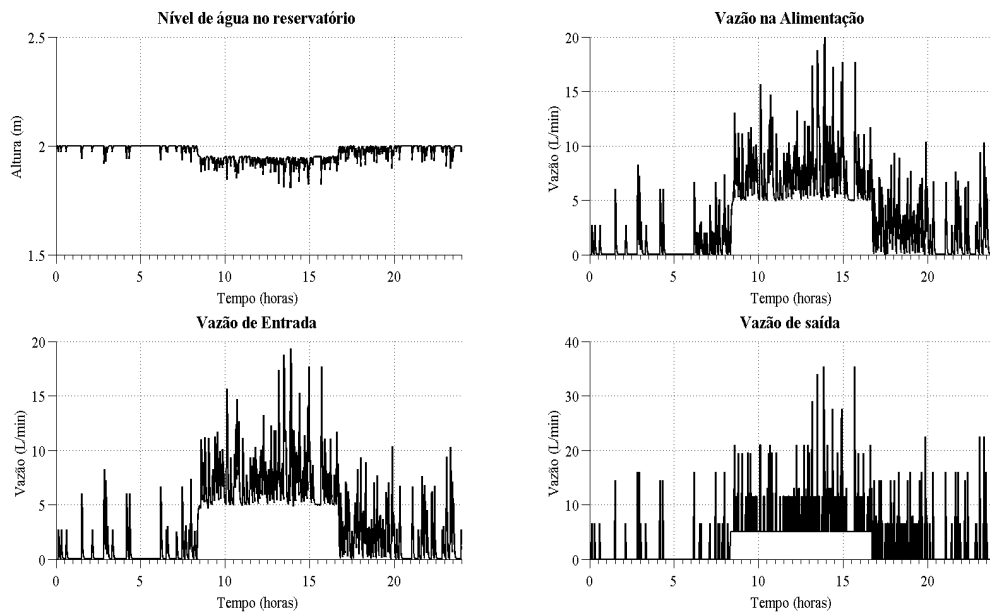
Tanto no caso da detecção de vazamentos na alimentação do sistema, como na residência, o sistema espera uma hora (equivalente a 60 medições) para alertar o usuário sobre a presença de um possível vazamento.

Figura 7.4: Detalhes do vazamento e do sinal de detecção.



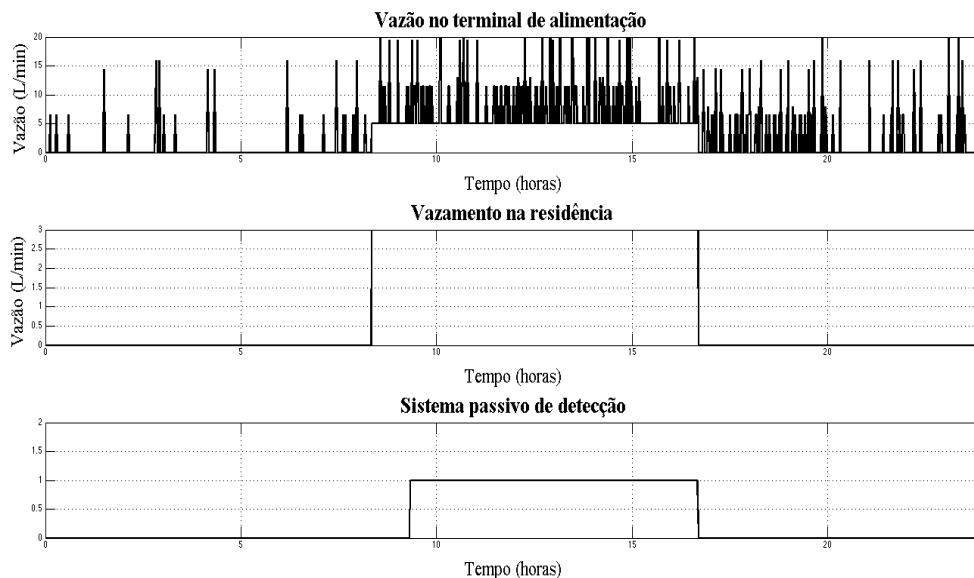
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7.5: Sistema simulado com a presença de um vazamento na residência.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7.6: Detalhes do vazamento na residência e do sinal de detecção.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.3 Resultados da detecção a partir do módulo ativo

Nesta seção, serão discutidos os resultados obtidos para o sistema de detecção ativa, que, como já explanado no Capítulo 6, necessita da operação de um usuário e faz uso dos atuadores (válvulas) instalados nas tubulações.

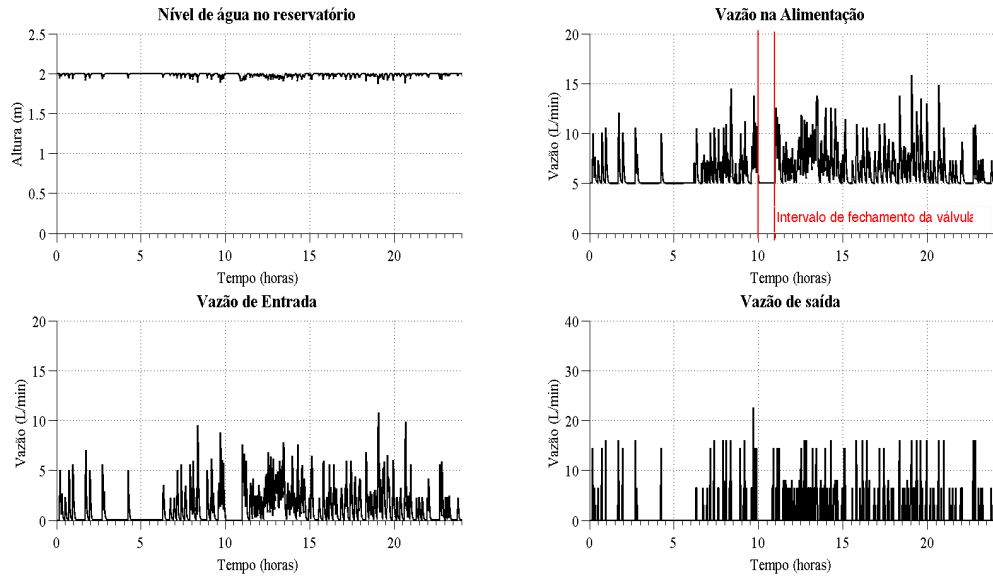
A Figura 7.7 mostra os valores de medição dos sensores. Nota-se que, quando ocorre o fechamento da válvula em  $S2$  (destacado pelas linhas verticais vermelhas, onde a primeira indica o fechamento e a segunda a abertura), o vazamento antes do reservatório fica evidenciado (neste caso, o sistema apresenta um vazamento de  $5L/min$ ).

Para o caso de vazamentos no reservatório, o sistema faz o fechamento das válvulas  $S2$  e  $S3$ , em seguida, verifica o comportamento do nível de água no reservatório. Caso o nível apresente um comportamento decrescente, o sistema acusará uma possível falha. A Figura 7.8 mostra os dados com o sistema ativo em funcionamento para este caso. Neste caso, ao serem fechadas as válvulas de entrada e saída, o nível de água no reservatório reduziu, sendo assim, o sistema indicou um provável vazamento no reservatório.

### 7.4 Considerações finais dos resultados

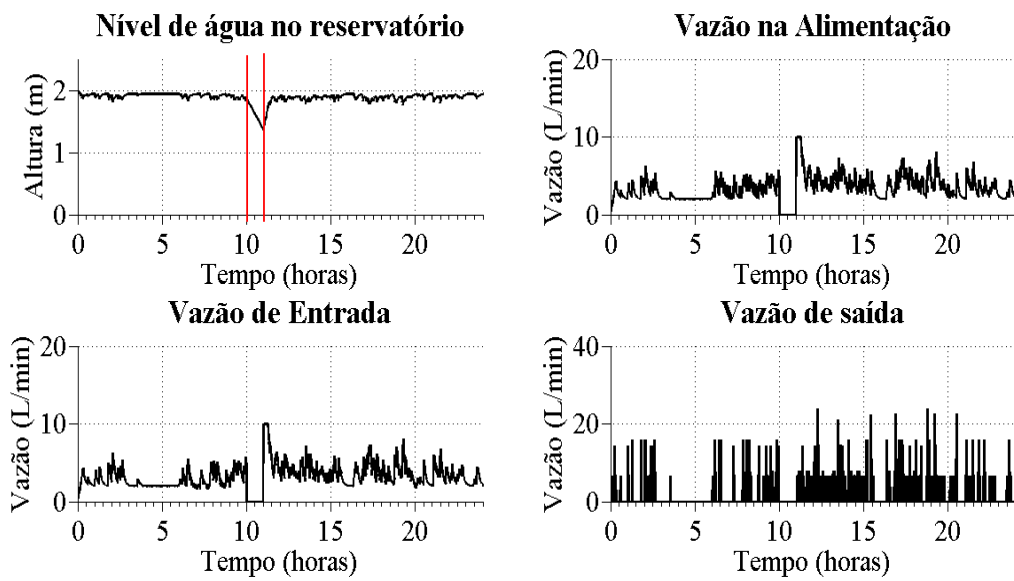
A partir dos resultados aqui apresentados, é possível notar que o sistema de detecção de vazamentos proposto neste trabalho funciona de forma satisfatória mesmo sem a presença de um motor de inferência ou de métodos mais sofisticados.

Figura 7.7: Detecção de vazamento na entrada utilizando o módulo ativo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7.8: Detecção de vazamento no reservatório utilizando o módulo ativo.



Fonte: Elaborado pelo autor

---

# Capítulo 8

## Conclusão

---

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de fornecer um sistema capaz de detectar vazamentos em sistemas de distribuição e armazenamento de água em residências e prédios. Para isto, foi necessário criar um sistema capaz de simular o comportamento de consumo da água durante um período de 24 horas para testes e validação.

O sistema de simulação de consumo desenvolvido utilizou como base, dados coletados por um estudo realizado no Brasil que demonstram o perfil de consumo de água e os seus usos finais diferenciados por diferentes tipos de aparelhos.

A partir dos resultados mostrados no Capítulo 7 é possível concluir que o algoritmo do simulador consegue aproximar bem o consumo de um sistema real, possibilitando assim, o desenvolvimento de um sistema capaz de detectar as falhas.

O sistema para detecção de vazamentos apresentado no Capítulo 6 utiliza dois módulos de detecção, um passivo e outro ativo. O primeiro trabalha sem a necessidade de intervenção de um operador humano. Já o segundo necessita que o usuário insira algumas configurações antes de iniciar o procedimento de detecção. Por outro lado, o módulo de detecção ativa, nos resultados apresentados, detecta mais rapidamente e com maior segurança um vazamento.

No caso deste estudo, tal sistema foi validado através do uso de simuladores. Porém, devido a simplicidade do algoritmo utilizado, o sistema de detecção pode ser implementado sem apresentar muita dificuldade em sistemas embarcados simples, como por exemplo um Arduino, ou até mesmo em controladores comerciais utilizados na área de automação residencial. Para tanto, em uma residência real, sensores de vazão e nível, além de válvulas eletromecânicas deverão ser instaladas nas tubulações de água fria da residência. Em seguida, estes deverão se comunicar com o controlador no qual o sistema de detecção deverá estar implementado.

Além da aplicação citada no parágrafo acima, outra sugestão de aplicabilidade para este trabalho é a utilização de técnicas mais elaboradas para a detecção de vazamentos, como por exemplo, a utilização de RNAs, ou até mesmo a implementação de um motor de inferência, criando assim um sistema especialista, para uma melhor detecção e segurança do sistema.

---

## Referências Bibliográficas

---

BARRETO, D. Perfil do consumo residencial e usos finais de água. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, Brasil, v. 8, p. 23–40, jun. 2008. ISSN 1678-8621.

BEGOVICH, O.; VILLALOBOS, G. V. Dsp application of a water-leak detection and isolation algorithm. In: *7ª International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control*. México: IEEE, 2010. p. 93–98. ISBN 978-1-4244-7314-4.

CAMARGO, R. A possível futura escassez de água doce que existe na terra é a principal preocupação das autoridades. *SINERGIA*, IFSP, v. 3, p. 35–41, 2002. ISSN 2177-451X.

COELHO, A.; COELHO, L. dos S. *Identificação de sistemas dinâmicos lineares*. Editora da UFSC, 2004. (Didática (Editora da UFSC)). ISBN 9788532802804. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=RJujAAAACAAJ>>.

CONVEY, H. J.; BOOTH, M. J. Development of a water leak detection system. *Computing e Control Engineering Journal*, IEEE, v. 13, p. 33–38, 2002. ISSN 0956-3385.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de controle modernos*. 11. ed. Brasil: LTC, 2009. ISBN 8521617143.

EL-SHIEKH, T. M. Leak detection methods in transmission pipelines and error sources. *Energy Sources*, v. 32, 2010. ISSN 1556-7036.

FÁVERO, A. J.; SANTOS, N. M. dos. *Sistemas especialistas*. 2014. <<http://www.din.uem.br/~ia/especialistas/>>.

FLORES, C. D. *Fundamentos dos sistemas especialistas*. Porto Alegre, Brasil, 2003.

FONSECA, D. G. V. da. *Modelagem e controle adaptativo de uma planta didática de nível com instrumentação industrial*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFRN, Natal, RN, 2012.

FREIRE, H. G. da C. V. *Sistema para detecção de vazamentos de água em prédios e residências*. Monografia — UFRN, 2013.

GAMA-MORENO, L. et al. Instrumentation of a water-leaks detection system controlled via the short message service through the gsm network. In: *2010 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*. Cuernavaca, Mexico: IEEE, 2010. p. 655–659. ISBN 978-1-4244-8149-1.

- GERTLER, J. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. EUA: CRC Press, 1998. ISBN 0-82479-427-3.
- JIN, Y.; YUMEI, W.; PING, L. Approximate entropy-based leak detection using artificial neural network in water distribution pipelines. In: *11<sup>a</sup> International Conference on Control Automation Robotics and Vision*. Singapura: IEEE, 2010. p. 1029–1034.
- MAYER, P. W.; DEOREO, W. B. *Residential end uses of water*. EUA: AWWA Research Foundation, 1999. ISBN 1-58321-016-4.
- NASCIMENTO, C.; YONEYAMA, T. *Inteligência artificial em controle e automação*. São Paulo, Brasil: EDGARD BLUCHER, 2000. ISBN 9788521203100.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Pearson Education - BR, 2011. ISBN 8-57605-810-3.
- PINTO, J. *Instalações Prediais de Água Fria*. Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil: [s.n.], s.d. Centro Universitário Franciscano. Notas de Aula.
- REBOLÇAS, A. *Uso inteligente da água*. São Paulo, Brasil: Escrituras, 2004.
- REBOUÇAS, D. L. *Utilização de redes neurais artificiais para detecção e diagnóstico de falhas*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, UFRN, Natal, RN, jun 2011.
- SILVA, D. R. C. *Sistema de Detecção e Isolamento de Falhas em Sistemas Dinâmicos Baseado em Identificação Paramétrica*. Tese (Doutorado) — UFRN, Natal, RN, dez. 2008.
- SOUZA, D. C. de et al. Br-plantexpert: Um sistema especialista para auxílio à tomada de decisão em processos industriais. In: *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2012*. Campina Grande, Brasil: [s.n.], 2012. p. 1127–1134. ISBN 978-85-8001-069-5.
- TANG, X. et al. Leak detection of water pipeline using wavelet transform method. In: *International Conference on Environmental Science and Information Application Technolog.* Wuhan, China: IEEE, 2009. p. 217–220. ISBN 978-0-7695-3682-8.
- VICTOR, V. F. *Sistema especialista para detecção de falhas em comandos elétricos*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFRN, Natal, RN, jul 2005.
- WATERMAN, D. *A Guide to Expert Systems*. Addison-Wesley, 1986. (Teknowledge series in knowledge engineering). ISBN 9780201083132. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=js0mAAAAMAAJ>>.

---

## Anexo A

### Tabela de Consumo de aparelhos segundo a NBR5626

---

Segundo a ABNT, em condições dinâmicas (com escoamento), a pressão da água nos pontos de utilização deve ser estabelecida de modo a garantir a vazão de projeto indicada na Tabela A.1 e o bom funcionamento da peça de utilização.

Tabela A.1: Vazão nos pontos de utilização em função da peça de utilização

Aparelho Sanitário		Peça de Utilização	Vazão de Projeto <i>L/s</i>
Bacia Sanitária		Caixa de descarga	0,15
Bacia Sanitária		Válvula de descarga	1,70
Banheira		Misturador	0,30
Banheira		Registro de pressão	0,10
Bidê		Misturador	0,10
Chuveiro ou ducha		Misturador	0,20
Chuveiro Elétrico		Registro de pressão	0,10
Lavadora de Pratos ou de roupas		Registro de pressão	0,30
Lavatório		Torneira ou misturador	0,15
Mictório cerâmico	Com sifão integrado	Válvula de descarga	0,50
Mictório cerâmico	Sem sifão integrado	Caixa de descarga, registro de pressão ou válvula de descarga	0,15
Mictório tipo calha		Caixa de descarga ou registro de pressão	0,15 por metro de calha
Pia		Torneira ou misturador	0,25
Pia		Torneira elétrica	0,10
Tanque		Torneira	0,25
Torneira de jardim ou lavagem em geral		Torneira	0,20

Fonte: NBR5626

---

## Anexo B

### Consumo diário e usos finais de água

---

A Tabela B.1 apresenta os consumos médios diários obtidos após o tratamento dos dados coletados pela instrumentação nas residências monitoradas.

Tabela B.1: Consumo médio diário por tipo de aparelho (litros por dia)

Residência	Chuveiro	Torneira da Cozinha	Lavatório	Tanque	Tanquinho	Máquina de Lavar	Caixa Acoplada	Máquina + tanque	Outros usos	Total
1	*	113	50	50	*	*	*	*	255	<b>438</b>
2	60	90	14	*	*	*	*	63	215	<b>442</b>
3	200	71	39	*	*	148	*	*	314	<b>772</b>
4	58	78	18	3	*	18	42	*	*	<b>217</b>
5	87	82	55	*	*	*	*	*	*	<b>224</b>
6	40	75	25	69	28	*	*	*	202	<b>439</b>
7	190	127	25	*	112	*	*	*	205	<b>659</b>
<b>Média</b>	<b>106</b>	<b>87</b>	<b>29</b>	<b>36</b>	<b>70</b>	<b>83</b>	<b>42</b>	<b>63</b>	<b>234</b>	<b>459</b>

Fonte: (BARRETO, 2008)

A Tabela B.2 apresenta o consumo percentual dos aparelhos monitorados relativamente ao consumo total da residência.

Os valores da Tabela B.3 refletem os consumos per capita médios que foram obtidos dos resultados das planilhas de monitoração considerando os consumos dos pontos de utilização.

Estes dados foram utilizados como base para a criação do *software* que simula o consumo de uma residência neste trabalho.

Tabela B.2: Percentuais relativos dos aparelhos no consumo diário médio

Residência	Chuveiro	Torneira da Cozinha	Lavatório	Tanque	Tanquinho	Máquina de Lavar	Caixa Acoplada	Máquina + tanque	Outros usos	Total
1	*	26%	11%	11%	*	*	*	*	51%	100%
2	14%	20%	3%	*	*	*	*	14%	49%	100%
3	26%	9%	5%	*	*	19%	*	*	41%	100%
4	27%	36%	8%	1%	*	9%	20%	*	*	100%
5	39%	37%	25%	*	*	*	*	*	*	100%
6	9%	17%	6%	16%	6%	*	*	*	46%	100%
7	29%	19%	4%	*	17%	*	*	*	31%	100%
<b>Média</b>	<b>106</b>	<b>87</b>	<b>29</b>	<b>36</b>	<b>70</b>	<b>83</b>	<b>42</b>	<b>63</b>	<b>234</b>	<b>100%</b>

Fonte: (BARRETO, 2008)

Tabela B.3: Consumo médio diário per capita por ponto de utilização e por morador

Ponto de utilização	Participação (%)	Consumo (L/dia)	Consumo per capita (L/dia/hab)
Chuveiro	13,9	106	35,3
Pia de cozinha	12,0	91	30,3
Máquina de lavar roupas	10,9	83	27,7
Tanque de lavar	9,2	70	23,3
Tanque com máquina de lavar	8,3	63	21,0
Caixa acoplada	5,5	42	14,0
Tanque	5,4	41	13,6
Lavatório	4,2	32	10,8
Outros usos	30,6	232	77,4
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>788</b>	<b>262,7</b>

Fonte: (BARRETO, 2008)