



## Laís dos Santos Gonçalves

### Projeto de hidrômetro baseado em um sensor resistivo de filme fino para medição de consumo de água em unidades autônomas

#### Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

Orientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa  
Coorientadora: Khrissy Aracély Reis Medeiros

Rio de Janeiro,  
abril de 2022



**Laís dos Santos Gonçalves**

**Projeto de hidrômetro baseado em um sensor resistivo de  
filme fino para medição de consumo de água em unidades  
autônomas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Aprovada pela  
Comissão Examinadora abaixo:

**Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa, Dr.**

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

**Khrissy Aracélly Reis Medeiros, Dra.**

Coorientadora

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Maria Helena Farias**

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO)

**Prof. José Franco Machado do Amaral**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

**Prof. Jorge Luis Machado do Amaral**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Rio de Janeiro, 28 de abril de 2022

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da autora, do orientador e da universidade.

### **Laís dos Santos Gonçalves**

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), em 2019. Atualmente mestranda do Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI) pela PUC-Rio.

#### Ficha Catalográfica

Gonçalves, Laís dos Santos

Projeto de hidrômetro baseado em um sensor resistivo de filme fino para medição de consumo de água em unidades autônomas / Laís dos Santos Gonçalves; orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa; coorientadora: Khrissy Aracélly Reis Medeiros. – 2022.

120 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2022.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Metrologia para Qualidade e Inovação – Teses. 3. Metrologia. 4. *Bend sensor*. 5. Consumo de água. 6. Medição individualizada. 7. Simulação computacional. I. Barbosa, Carlos Roberto Hall. II. Medeiros, Khrissy Aracélly Reis. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. IV. Título.

CDD: 389.1

Dedico inteiramente este trabalho de pesquisa aos meus pais. Meus dois maiores impulsionadores para realizações dos meus sonhos. Meu eterno agradecimento.

## Agradecimentos

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

Aos meus pais, Luiz e Andrea, por todo apoio, carinho, amor e dedicação que têm por mim. Agradeço também por não medirem esforços para me ajudar e por acreditarem sempre em mim. Sou eternamente grata por ter vocês na minha vida. Eu amo vocês.

À minha família toda e amigos que torcem por mim, em especial à minha prima Larissa Ribeiro pelas madrugadas de incentivo, companheirismo e apoio.

Ao meu orientador Carlos Roberto Hall Barbosa pela orientação, pela confiança, pela oportunidade e por prontamente me ajudar sempre que precisei. Deixo aqui também minha admiração e meu respeito.

À minha indescritível coorientadora Khrissy Aracélly Reis Medeiros por acreditar em mim, pelos conselhos e orientações, por toda sua dedicação e motivação dada durante a realização deste trabalho. Esta dissertação também pertence a você. *We are the champions.*

Ao Laboratório de Materiais do Centro Tecnológico do Exército – Brasil (CTEx), especialmente ao Tenente-Coronel Marcel Zylberberg (atualmente no Parque Regional de Manutenção da 7ª Região Militar – Pq R Mnt/7) por abrir as portas do laboratório para a realização da caracterização eletrotérmica desta pesquisa e, à capitã Tamara e ao capitão Rodrigues pela disponibilidade e receptividade.

Ao Lucas Azevedo pela disponibilidade e fundamental contribuição e ajuda que deu na construção da bancada de teste.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

## Resumo

Gonçalves, Laís dos Santos; Barbosa, Carlos Roberto Hall (orientador); Medeiros, Khrissy Aracélly Reis (Coorientadora). **Projeto de hidrômetro baseado em um sensor resistivo de filme fino para medição de consumo de água em unidades autônomas**. Rio de Janeiro, 2022. 120 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em consequência de modificações econômicas, populacionais e nos padrões de consumo, a utilização de água doce aumentou significativamente nos últimos 100 anos. Notoriamente, a medição mostra-se primordial para estimular a conservação da água. Sendo assim, esta dissertação tem por intuito contribuir para o aprimoramento das tecnologias dos hidrômetros, mais especificamente para medição do volume de água escoado em uma tubulação de unidades autônomas em edifícios. Com isso, o presente estudo objetiva avaliar a aplicabilidade de um sensor resistivo de filme fino (*bend sensor*), com diferentes revestimentos e comprimentos, para implementação em sistemas de medição individualizada de água. Além disso, a motivação deste trabalho é propor um hidrômetro utilizando as válvulas de controle de fluxo que, normalmente, já estão presentes nas instalações hidráulicas condominiais, evitando, assim, a necessidade de obras maiores em prédios antigos, que possuem medição coletiva de consumo de água. Metodologicamente, apresenta-se o sistema desenvolvido para as caracterizações eletromecânica e térmica do sensor, a simulação computacional do sensor realizada por meio do software Ansys e do circuito eletrônico feita no software LTspice<sup>®</sup>, o treinamento de uma rede neural artificial e as estimativas de volume a partir de pulsos trapezoidais. Os resultados obtidos permitiram avaliar, levando em consideração o tipo de revestimento, que o sensor revestido com poliéster possui um melhor comportamento para o hidrômetro proposto. Além disso, esta avaliação permitiu concluir que o *bend sensor* demonstrou viabilidade para ser utilizado como transdutor deste medidor volumétrico, podendo ser facilmente inserido dentro de algum componente hidráulico, como uma válvula de controle de fluxo, por exemplo.

## Palavras-chave

Metrologia; *bend sensor*; consumo de água; medição individualizada; simulação computacional.

## Abstract

Gonçalves, Laís dos Santos; Barbosa, Carlos Roberto Hall (Advisor); Medeiros, Khrissy Aracélly Reis (Co-advisor). **Design of hydrometer based on a thin-film resistive sensor for measuring water consumption in autonomous units.** Rio de Janeiro, 2022. 120 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As a result of economic, population, and consumption patterns changes, the use of freshwater has increased significantly in the last 100 years. Notably, measurement is essential to encourage water conservation. Therefore, this dissertation aims to contribute to the advancement of water meter technologies, specifically for measuring the volume of water drained in a pipeline of autonomous units in buildings. Thus, the present study aims to evaluate the applicability of a thin-film resistive sensor (bend sensor) with different coatings and lengths for implementation in individualized water measurement systems. In addition, the motivation of this work is to propose a volumetric meter using flow control valves that, ordinarily, are already present in the buildings hydraulic installations, thus avoiding the need for large-scale works in old buildings, which have collective measurement of water consumption. Methodologically, it is presented the system developed for the electromechanical and thermal characterization of the sensor, the computational simulation of the sensor performed using the Ansys software, and of the electronic circuit designed in LTSpice<sup>®</sup> software, the training of artificial neural network and the volume estimates from trapezoidal pulses. The results obtained allowed us to assess that, taking into account the type of coating, the sensor coated with polyester has better behavior for the proposed hydrometer. In addition, this evaluation allowed to conclude that the bend sensor demonstrated the feasibility to be used as a transducer of this volumetric meter and can be easily inserted inside a hydraulic component, as a flow control valve, for example.

## Keywords

Metrology; bend sensor; water consumption; individualized measurement; computational simulation.

# Sumário

<b>1 Introdução</b>	<b>22</b>
1.1 Contextualização .....	26
1.2 Motivação .....	28
1.3 Objetivos: geral e específicos.....	32
1.4 Estrutura da dissertação.....	33
<b>2 Sensor resistivo de filme fino – <i>Bend Sensor</i></b>	<b>34</b>
2.1. Princípio de funcionamento.....	34
2.2. Caracterização eletromecânica.....	37
2.3. Caracterização eletrotérmica .....	40
<b>3 Projeto do medidor volumétrico</b>	<b>42</b>
3.1. Conceito do medidor .....	42
3.2. Simulação em Ansys.....	45
3.3. Circuitos eletrônicos de leitura .....	49
3.4. Redes Neurais Artificiais (RNAs) .....	53
3.5. Simulação da Operação do Medidor.....	56
<b>4 Resultados e Discussões</b>	<b>60</b>
4.1. Avaliação do comportamento do <i>bend sensor</i> .....	61
4.1.1. Caracterização eletromecânica	61
4.1.1.1. Método A	61
4.1.1.2. Método B	65
4.1.1.3. Método C	68
4.1.2. Caracterização eletrotérmica	73
4.2. Simulação em Ansys.....	81
4.3. Simulação em LTSpice® .....	83

4.4. Simulação da Operação do Medidor .....	88
4.4.1. <i>Bend sensor</i> com uma polegada de comprimento .....	90
4.4.2. <i>Bend sensor</i> com duas polegadas de comprimento .....	95
<b>5 Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>102</b>
<b>6 Referências bibliográficas</b>	<b>107</b>
<b>Apêndice A – Código Rede Neural Artificial do Matlab</b>	<b>115</b>
<b>Anexo A – Folder Medição Individualizada (EMBASA)</b>	<b>116</b>
<b>Anexo B – Ficha Técnica da Torneira Docol</b>	<b>117</b>
<b>Anexo C – Ficha Técnica do Chuveiro Tradicional Docol</b>	<b>118</b>
<b>Anexo D – Artigo Congresso Brasileiro de Metrologia 2021</b>	<b>119</b>
<b>Anexo E – Artigo <i>XXIII IMEKO World Congress</i></b>	<b>120</b>

## Lista de figuras

Figura 1 – Diferentes mecanismos de funcionamento de hidrômetros [adaptado de 12]: (a) Hidrômetro taquimétrico monojato; (b) Hidrômetro taquimétrico multijato. ....	24
Figura 2 – Hidrômetro volumétrico [12]. ....	25
Figura 3 – Inscrições e marcas obrigatórias do mostrador de um hidrômetro. ....	26
Figura 4 – Ordem cronológica da promulgação das leis que tornam obrigatória a instalação de hidrômetros individualizados para cada unidade autônoma.....	28
Figura 5 – Possíveis localizações dos hidrômetros [adaptado de 12]: (a) Posicionamento dos hidrômetros no pavimento cobertura; (b) Posicionamento dos hidrômetros no pavimento térreo; (c) Posicionamento dos hidrômetros nos andares da edificação.....	28
Figura 6 – Diagrama esquemático da curvatura do sensor resistivo, partindo do estado estático para a velocidade do fluxo de água (k0) em uma tubulação [26].....	29
Figura 7 – Normas e Regulamentos técnicos.....	30
Figura 8 – Desenho esquemático das tubulações de água em um apartamento, destacando a válvula do registro geral [adaptado de 27]...	31
Figura 9 – Desenho esquemático do bend sensor: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.....	34
Figura 10 – Bend sensors de diferentes comprimentos e com distintos tipos de revestimentos. ....	35
Figura 11 – Desenho esquemático das metodologias da caracterização eletromecânica dos sensores resistivos de filme fino: (a) Método A; (b) Método B; (c) Método C. ....	38
Figura 12 – (a) Câmara climática THERMOTRON; (b) Setup com o bend sensor posicionado dentro da câmara climática; (c) Multímetro localizado na parte externa da câmara para medição da resistência do sensor. ....	40
Figura 13 – Variação do ângulo de rotação: (a) Sensor curvado em 30°;	

(b) Sensor curvado em 70° . . . . .	41
Figura 14 – Desenho 3D da válvula gaveta: (a) Fechada; (b) Aberta. ....	43
Figura 15 – (a) Vista lateral da válvula gaveta aberta com o bend sensor; (b) Tampa da válvula com a cunha toda recolhida. ....	43
Figura 16 – Tampa da válvula gaveta com a cunha de borracha adaptada com o sensor fixado na peça cinza: (a) Válvula fechada; (b) Válvula aberta. ....	44
Figura 17 – Simulação no Ansys: (a) Do escoamento da água no Fluent; (b) Da flexão do sensor resistivo no Mechanical. ....	45
Figura 18 – Curva de flexão de uma viga engastada [adaptado de 42]: (a) Viga engastada; (b) Viga flexionada. ....	48
Figura 19 – Viga engastada: (a) Submetida a um carregamento uniforme; (b) Deflexão máxima da viga [adaptado de 42]. ....	48
Figura 20 – Circuito do divisor de tensão. ....	50
Figura 21 – Componente que simula o comportamento resistivo do bend sensor no LTSpice®. ....	51
Figura 22 – Configuração do circuito eletrônico no LTSpice®. ....	52
Figura 23 – Neurônio: (a) Biológico; (b) Artificial [adaptado de 46]. ....	53
Figura 24 – Esquema do Matlab da rede neural artificial com função de base radial. ....	56
Figura 25 – Curva de vazão da torneira do fabricante Docol [Anexo B]...	57
Figura 26 – Curva de vazão do chuveiro tradicional do fabricante Docol [Anexo C]. ....	57
Figura 27 – Representação esquemática dos passos realizados para validar o conceito de medição do medidor proposto. ....	59
Figura 28 – Mapeamento do conteúdo do capítulo 4. ....	60
Figura 29 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de uma polegada de comprimento com revestimento de poliéster: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada. ....	62
Figura 30 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de uma polegada de comprimento com revestimento de poliimida: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo;	

(b) Resistência média e ajustada. .... 62

Figura 31 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de uma polegada de comprimento sem revestimento: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada..... 63

Figura 32 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliéster: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada. .... 63

Figura 33 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliimida: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada. .... 64

Figura 34 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de duas polegadas de comprimento sem revestimento: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada..... 64

Figura 35 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de uma polegada de comprimento com revestimento de poliéster: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada. .... 65

Figura 36 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de uma polegada de comprimento com revestimento de poliimida: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada. .... 66

Figura 37 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de uma polegada de comprimento sem revestimento: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada..... 66

Figura 38 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliéster: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada. .... 67

Figura 39 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliimida: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada. .... 67

Figura 40 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de duas polegadas de comprimento sem revestimento: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b)

Resistência média e ajustada.....	68
Figura 41 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de uma polegada de comprimento com revestimento de poliéster: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada. ....	69
Figura 42 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de uma polegada de comprimento com revestimento de poliimida: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada. ....	69
Figura 43 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de uma polegada de comprimento sem revestimento: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.....	70
Figura 44 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliéster: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada. ....	70
Figura 45 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliimida: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Equação de regressão e coeficiente de determinação ( $R^2$ ). ....	71
Figura 46 – Resistência em função do ângulo de rotação do bend sensor de duas polegadas de comprimento sem revestimento: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.....	72
Figura 47 – Resposta da resistência do bend sensor revestido de poliéster com duas polegadas de comprimento em relação à variação da temperatura para diferentes ângulos de rotação.....	74
Figura 48 – Resistência do primeiro bend sensor revestido de poliimida com duas polegadas de comprimento em relação à variação da temperatura para os ângulos de rotação: (a) 0°, 10° e 30°; (b) 50° e 70° .....	75
Figura 49 – Resposta da resistência do segundo bend sensor revestido de poliimida em relação a variação da temperatura para os ângulos de rotação: (a) 0°, 10° e 30°; (b) 50° e 70° .....	76
Figura 50 – Resposta da resistência do bend sensor – revestido de poliimida com uma polegada de comprimento – em relação a variação da temperatura para os ângulos de rotação: (a) 0°, 10° e 30°; (b) 50° e 60° .....	77

Figura 51 – Resposta da resistência do bend sensor – revestido de poliéster com uma polegada de comprimento – em relação a variação da temperatura para os ângulos de rotação: (a) 0° e 10°; (b) 30°, 50° e 60° .....	77
Figura 52 – Resposta do bend sensor revestido de poliéster com duas polegadas de comprimento: (a) Gráfico tridimensional da resistência média entre os valores de incremento e decremento da temperatura para cada ângulo; (b) Mapa de cores das grandezas medida; (c) Resistência do sensor em função da temperatura; (d) Resistência sensor em função do ângulo de deflexão.....	78
Figura 53 – Resposta do bend sensor revestido de poliéster – com uma polegada de comprimento – em relação à resistência média entre os valores de incremento e decremento da temperatura para cada ângulo, por meio de: (a) Gráfico tridimensional das grandezas medidas; (b) Mapa de cores.....	79
Figura 54 – Resistência do bend sensor revestido com poliéster em função: (a) da temperatura; (b) do ângulo de rotação.....	80
Figura 55 – Resposta da resistência em função da vazão: via simulação (verde) e regressão (vermelho).....	83
Figura 56 – Esquema do circuito eletrônico e dos condicionadores de sinal.....	84
Figura 57 – Relação entre a tensão do bend sensor revestido de poliéster com uma polegada de comprimento em função da vazão.....	84
Figura 58 – Resultado do treinamento da rede para obtenção da vazão instantânea a partir da tensão do bend sensor revestido de poliéster com uma polegada de comprimento. ....	85
Figura 59 – Resposta da resistência em função da vazão: via simulação (verde) e regressão (vermelho).....	86
Figura 60 – Esquema do circuito eletrônico e dos condicionadores de sinal.....	86
Figura 61 – Relação entre a tensão do bend sensor revestido de poliéster com duas polegadas de comprimento em função da vazão. ....	87
Figura 62 – Resultado do treinamento da rede para obtenção da vazão instantânea a partir da tensão do bend sensor revestido de poliéster com uma polegada de comprimento. ....	87
Figura 63 – Pulso trapezoidal da torneira para a unidade do 4° andar. ...	88
Figura 64 – Pulso trapezoidal do chuveiro tradicional para a unidade do	

4° andar.....	89
Figura 65 – Pulso trapezoidal da torneira para a unidade do 11° andar. .	89
Figura 66 – Pulso trapezoidal do chuveiro tradicional para a unidade do 11° andar.....	90
Figura 67 – Resposta do sensor perante o acionamento da torneira: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento da torneira; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial. ....	90
Figura 68 – Pulso trapezoidal via: simulação do bend sensor no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão da torneira para a unidade autônoma com 24 m.c.a (curva vermelha tracejada). ....	91
Figura 69 – Resposta do sensor perante o acionamento do chuveiro tradicional: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento do chuveiro; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial. ....	92
Figura 70 – Pulso trapezoidal via: simulação do bend sensor no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão do chuveiro tradicional para a unidade autônoma com 24 m.c.a (curva vermelha tracejada).....	92
Figura 71 – Resposta do sensor perante o acionamento da torneira: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento da torneira; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial. ....	93
Figura 72 – Pulso trapezoidal via: simulação do bend sensor no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão da torneira para a unidade autônoma com 3 m.c.a (curva vermelha tracejada). ....	94
Figura 73 – Resposta do sensor perante o acionamento do chuveiro tradicional: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento do chuveiro; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial. ....	94
Figura 74 – Pulso trapezoidal via: simulação do bend sensor no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão do chuveiro tradicional para a unidade autônoma com 3 m.c.a (curva vermelha tracejada).....	95
Figura 75 – Resposta do sensor perante o acionamento da torneira: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento da torneira; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial. ....	95
Figura 76 – Pulso trapezoidal via: simulação do bend sensor no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão da torneira para a unidade autônoma com 24 m.c.a (curva vermelha tracejada). ....	96
Figura 77 – Resposta do sensor perante o acionamento do chuveiro tradicional: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento do	

chuveiro; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial. ....97

Figura 78 – Pulso trapezoidal via: simulação do bend sensor no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão do chuveiro tradicional para a unidade autônoma com 24 m.c.a (curva vermelha tracejada).....97

Figura 79 – Resposta do sensor perante o acionamento da torneira: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento da torneira; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial. ....98

Figura 80 – Pulso trapezoidal via: simulação do bend sensor no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão da torneira para a unidade autônoma com 3 m.c.a (curva vermelha tracejada). ....99

Figura 81 – Resposta do sensor perante o acionamento do chuveiro tradicional: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento do chuveiro; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial. ....99

Figura 82 – Pulso trapezoidal via: simulação do bend sensor no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão do chuveiro tradicional para a unidade autônoma com 3 m.c.a (curva vermelha tracejada)..... 100

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados utilizados na simulação CFD do bend sensor com uma polegada de comprimento. ....	47
Tabela 2 – Dados utilizados na simulação CFD do bend sensor com duas polegadas de comprimento. ....	47
Tabela 3 – Histerese máxima e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da curva de cada sensor pelos Métodos A, B e C.....	72
Tabela 4 – Resultados da simulação Ansys com o bend sensor de uma polegada. ....	81
Tabela 5 – Resultados da simulação Ansys com o bend sensor de duas polegadas.....	82
Tabela 6 – Resumo das etapas de avaliação dos sensores resistivos de filme fino.....	101

## Lista de siglas, abreviaturas e símbolos

3D	3-Dimensional
°	ângulo
A	área transversal
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ampop	amplificador operacional
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
B1	fonte controlada de tensão
CAE	Computer Aided Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
°C	grau Celsius
$D_h$	diâmetro hidráulico
E	módulo de elasticidade do material
EMBASA	Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A
FEA	Finite Element Analysis
GPa	gigapascal
h	hora
I	momento de inércia
i	corrente elétrica
IMEKO	International Measurement Confederation
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
kg	kilograma
km	kilometro
$k\Omega$	kiloohm
L	comprimento
L	litro
m	metro
m.c.a.	metros de coluna d'água
min	minuto

mm	milímetro
NBR	Norma Brasileira
P	perímetro molhado
Pa	pascal
Q	terminal de entrada
$Q_v$	vazão volumétrica
q	intensidade do carregamento uniforme
$\dot{q}$	vazão instantânea
$\dot{q}_0$	vazão inicial
R	resistência elétrica
$R_0$	resistência inicial
$R^2$	Coefficiente de determinação
rad	radianos
RBF	Função de Base Radial
Re	número de Reynolds
RNAs	Rede Neurais Artificiais
$R_s$	resistência da simulação
s	segundo
SMI	Sistema de Medição Individualizada
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SST	Shear Stress Transport
t	espessura
t	tempo
U	velocidade média do fluido
V	diferença de potencial elétrico
v	velocidade
V	volt
V+ e V-	terminais
$V_{in}$	tensão de entrada
$V_{out}$	tensão de saída
W	largura
X1	sinal gerado pela simulação do sensor resistivo
$\delta$	deflexão máxima

$\theta$	ângulo de rotação máximo
$\mu$	viscosidade dinâmica do fluido
$\rho$	massa específica
$\Omega$	ohm
<i>vol</i>	volume

*“A tarefa de um homem é, até onde ele for capaz, fazer do mundo um lugar  
melhor pra se viver — sempre lembrando que os resultados serão infinitesimais  
— e cuidar da sua própria alma.”*

Leroy Percy

# 1 Introdução

Um dos recursos naturais mais imprescindíveis para a vida é a água. Ela está presente em praticamente todos os setores, como da saúde, da agricultura, da indústria e do consumo urbano e rural. Além disso, a água impacta diretamente em aspectos como o desenvolvimento social e econômico de um país e está profundamente relacionada a direitos humanos básicos, como o direito à vida e à saúde [1, 2]. Contudo, devido a alguns fatores, como o consumo desequilibrado da água, o seu desperdício e as mudanças climáticas, a escassez da água aumenta cada vez mais.

Aproximadamente, a quantidade de precipitação que cai anualmente na superfície da Terra é de 110 000 km<sup>3</sup>. Deste valor, cerca de 56 % correspondem à evapotranspiração das florestas e paisagens naturais e 5 % à agricultura de sequeiro, e os outros 39 % são convertidos em escoamento superficial – para alimentação de rios e lagos – e água subterrânea – para alimentação de aquíferos. Uma parte das águas é retirada destes rios e aquíferos por meio de instalações de infraestrutura, como reservatórios artificiais – hidrelétricas e açudes [3]. Adicionalmente, existem diversos fins desta retirada de água, por exemplo, industrial, agrícola – na qual inclui-se a irrigação, pecuária e aquicultura – e abastecimento humano e animal.

Segundo o informe anual de 2020 da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a precipitação no Brasil é de 15 610 km<sup>3</sup> por ano e a retirada de água devida à irrigação é de 1 038 m<sup>3</sup>/s, à evaporação líquida de reservatórios é de 759 m<sup>3</sup>/s, à indústria é de 202 m<sup>3</sup>/s, a termelétricas é de 93 m<sup>3</sup>/s e ao abastecimento animal, rural e urbano é de, respectivamente, 175 m<sup>3</sup>/s, 34 m<sup>3</sup>/s e 506 m<sup>3</sup>/s [4].

A demanda pela utilização de água no Brasil é crescente, com aumento estimado de aproximadamente 80 % no total retirado de água nas últimas duas

décadas. A previsão é de que, até 2030, o consumo aumente aproximadamente 25 %. O histórico da evolução da utilização da água está diretamente relacionado ao progresso econômico, ao aumento populacional e às modificações nos padrões de consumo do país [4, 5].

Complementarmente, a queda exponencial da qualidade da água e o estresse hídrico são outros aspectos preocupantes, que afetam bilhões de pessoas quando estimados basicamente pela disponibilidade em função do suprimento [5].

A denominada escassez econômica da água significa que fisicamente a água está à disposição, porém a infraestrutura para o seu acesso é precária, e muitas regiões do mundo se deparam com essa situação. Esta precariedade é decorrente de uma regulamentação deficiente, da falta de incentivos e/ou da falta de investimentos no setor hídrico [5]. Contudo, alguns estudos econômicos constataram que, ao se investir US\$ 1 em sistemas públicos de monitoramento hidrológico, em média, US\$ 4 são gerados em benefícios sociais [6], evidenciando o valor socioeconômico e a necessidade de mais estudos voltados para o crescimento tecnológico do setor hídrico.

No âmbito internacional, inúmeros estudos de diversas áreas que objetivam um consumo mais responsável podem ser encontrados. Ali *et al.* [7] apresentam um estudo em três unidades de produção da indústria química de couro com estratégias de minimização do consumo de água. Ozturk e Cinperi [8] também relatam uma diminuição do consumo de água em uma fábrica de tecidos de lã. E Gabarda-Mallorquí *et al.* [9] mostram um estudo da indústria hoteleira em Lloret de Mar, um destino turístico na costa mediterrânea, que apresenta resultados que contribuem para alcançar um uso eficiente da água e lidar com as mudanças da disponibilidade de água.

Ao comparar os indicadores de perdas de água do cenário nacional com os padrões de países desenvolvidos, que possuem uma média de 15 %, é possível observar um abastecimento que ainda denota uma distância da fronteira tecnológica em termos de eficiência. Segundo OLIVEIRA *et al.* [10], no Brasil, em 2018, o índice de perdas na distribuição foi de 38,45 %, 0,16 % a mais que no ano de 2017, demonstrando uma piora, e apontando a urgência de maiores esforços na redução de perdas.

Assim, é de extrema importância assimilar que as perdas de água potável acontecem de diferentes maneiras, sendo as mais corriqueiras os vazamentos,

roubos e furtos de água e erros de leitura ou leituras imprecisas devido aos hidrômetros serem muito antigos [10].

Além disso, em alguns países – como no Brasil – a água só começa a ser valorizada e racionada quando outros setores, por exemplo, o elétrico, enfrentam problemas, ou quando há longos períodos de estiagem, ou seja, muitas vezes, a preocupação não é diretamente relacionada à água em si, e sim, com outros recursos. Com isso, é necessária uma crise para o consumo de água obter sua devida atenção. Além disso, infelizmente, frequentemente a água é vista como algo garantido na Terra.

Notoriamente, a medição é um dos procedimentos mais eficazes para estimular a conservação da água. Conceitualmente, os hidrômetros são instrumentos de medição e indicação constante do volume de água que o atravessa. Estes medidores, dependendo do seu mecanismo de funcionamento, podem apresentar diferentes tipos de classificação.

De maneira geral, o medidor que funciona com a rotação da turbina ou hélice provocada pelo movimento da água que passa em seu interior é denominado hidrômetro taquimétrico (ou de velocidade). Já o medidor chamado de volumétrico possui um anel ou êmbolo, ao invés de uma hélice, que totaliza o volume que circula dentro do instrumento [11]. Na Figura 1(a) e na Figura 1(b) exemplificam-se os hidrômetros classificados como taquimétricos (ou de velocidade).

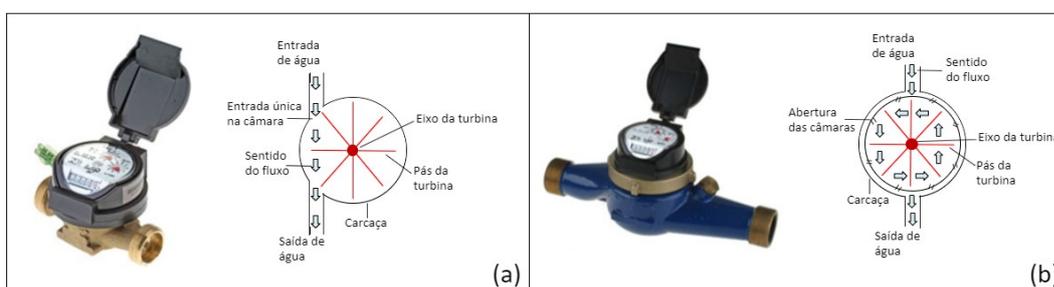


Figura 1 – Diferentes mecanismos de funcionamento de hidrômetros [adaptado de 12]: (a) Hidrômetro taquimétrico monojato; (b) Hidrômetro taquimétrico multijato.

Por sua vez, a Figura 2 exemplifica o hidrômetro denominado volumétrico.



Figura 2 – Hidrômetro volumétrico [12].

Além destas classificações, os hidrômetros podem ser categorizados de acordo com o dispositivo de transmissão presente no medidor, por exemplo – transmissão mecânica – no qual, através de um eixo, os movimentos são transferidos mecanicamente – e transmissão magnética – no qual os movimentos são transmitidos por meio de dois elementos magnéticos [11].

A Portaria INMETRO nº 246, de 17 de outubro de 2000 [13], estabelece quais condições os medidores de volume de água potável fria que escoam em uma tubulação fechada devem satisfazer. Além disso, este regulamento se destina aos medidores com dispositivos para indicação do volume integrado e que possuem princípio de funcionamento elétrico, eletrônico ou mecânico. Adicionalmente, algumas destas condições são:

- Proporcionar um funcionamento prolongado compatível com o ensaio de fadiga;
- Assegurar sua inviolabilidade;
- Ser construídos com materiais resistentes a numerosos tipos de corrosão acarretada pela água e suas impurezas, podendo assegurar tal proteção utilizando um tratamento superficial;
- Ser produzidos com materiais resistentes às variações de temperatura de água entre + 1 °C e + 40 °C;
- E, também, ser compostos com materiais suficientemente sólidos e ter uma resistência adequada à sua utilização, durante a qual as suas características metrológicas e técnicas sejam mantidas.

Além disso, segundo determinações da Portaria INMETRO nº 246, de 17 de outubro de 2000 [13], o hidrômetro deve possuir inscrições e marcas obrigatórias sobre sua carcaça, seu mostrador, seu suporte da tampa (anel) ou na sua tampa, se

estes dois últimos não forem facilmente removíveis. Como exemplo, a Figura 3 apresenta as inscrições e marcas obrigatórias que um mostrador de um hidrômetro deve possuir: (1) vazão nominal e identificação da posição de instalação, acompanhada da respectiva classe metrológica, exceto na carcaça; (2) indicador do consumo em metros cúbicos e seus múltiplos – obrigatoriamente na cor preta; (3) marca ou símbolo do fabricante; (4) unidade de medida do volume em  $m^3$ ; (5) e (6) indicador dos submúltiplos do metro cúbico, centenas de litros e dezenas de litros, respectivamente – obrigatoriamente na cor vermelha; e, por fim, (7) marca de aprovação do modelo e indicação da classe metrológica.

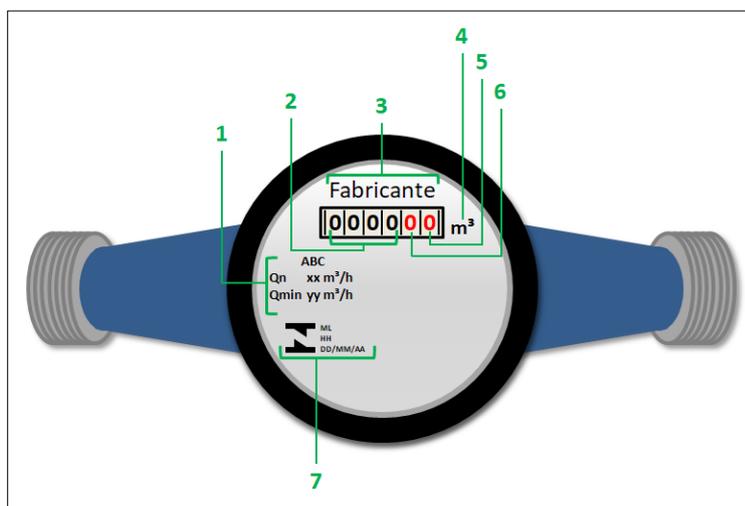


Figura 3 – Inscrições e marcas obrigatórias do mostrador de um hidrômetro.

Neste sentido, devido à importância dos hidrômetros no setor hídrico, é de extrema relevância que mais estudos possam ser realizados a fim de contribuir para o avanço das tecnologias dos hidrômetros, de forma a superar as limitações dos atuais e fazer com que estes medidores sejam cada vez mais modernos e com alta confiabilidade.

## 1.1 Contextualização

Norteados pela Lei nº 13.312, de 2016, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, observa-se que uma área em ampla expansão para um consumo hídrico mais responsável é a predial. A partir de julho de 2021, esta lei tornou obrigatória a adoção de padrões de sustentabilidade ambiental, como a

medição individualizada do consumo hídrico nas novas edificações condominiais [14].

Teoricamente, este Sistema de Medição Individualizada (SMI) de água corresponde à instalação de um hidrômetro no ramal de cada unidade autônoma em edifícios, que pode ser residencial, comercial ou mista.

Contudo, uma grande quantidade de condomínios possui uma medição hídrica coletiva, ou seja, a medição do consumo mensal de água é feita para o prédio inteiro. Esta maneira de medição acaba sendo injusta para os moradores, porque não considera o que cada apartamento consumiu, e sim o que o prédio inteiro consumiu. E, ainda mais alarmante, alguns prédios não possuem nenhum tipo de equipamento para medir o volume de água fornecida, com o consumo sendo estimado a partir do número de quartos do imóvel ou em função da área construída, em metros quadrados (m<sup>2</sup>). Nesta conjuntura, a individualização ocasiona maior equidade na conta de água, pois cada apartamento paga apenas pelo seu gasto e proporciona um consumo mais consciente, com menos desperdício.

Além disso, esta lei não torna obrigatória a mudança de medição coletiva para individual em prédios antigos (construídos antes da lei entrar em vigor), porém alguns estudos de caso [15–17] indicam uma melhora significativa tanto na conta quanto no desperdício de água, o que impulsiona sua implantação voluntária por parte dos condôminos. Por este motivo, o SMI de água foi implementado anteriormente à Lei n° 13.312, de 2016, em diversos lugares do país, tais como: Recife – PE (Lei n° 16.759 de, 17 de abril de 2002), Curitiba – PR (Lei n° 10.785, de 18 de setembro de 2003), Distrito Federal (Lei n° 3.557, de 18 de janeiro de 2005), Niterói – RJ (Lei n° 2.340, de 06 de junho de 2006), Salvador – BA (Lei n° 7.780, de 21 de dezembro de 2009), Três Rios – RJ (Lei n° 4.500, de 25 de maio de 2018) e Rio de Janeiro – RJ (Lei Complementar n° 198, de 14 de janeiro de 2019), que promulgaram leis que tornam obrigatória a instalação de hidrômetros individualizados para cada unidade autônoma (residencial, comercial ou mista) em edifícios [18–24]. A Figura 4 apresenta de forma cronológica a ordem da promulgação destas leis.

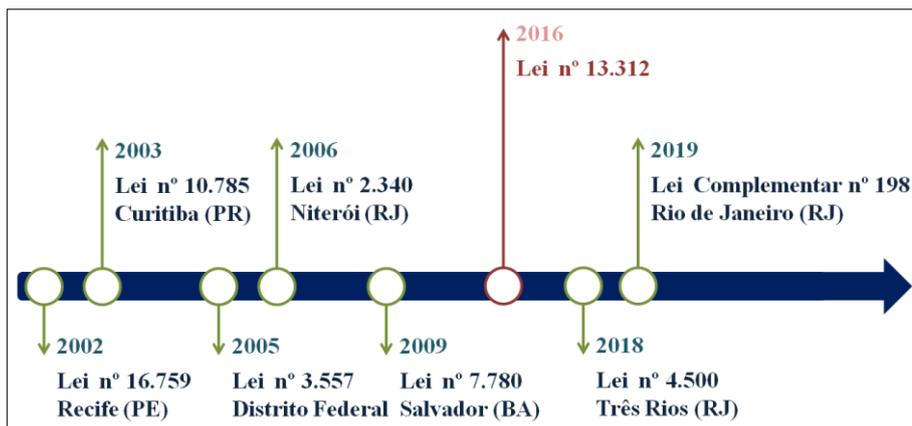


Figura 4 – Ordem cronológica da promulgação das leis que tornam obrigatória a instalação de hidrômetros individualizados para cada unidade autônoma.

## 1.2 Motivação

Comumente, a medição, tanto coletiva quanto individual, do consumo hídrico é feita pelos hidrômetros, porém sua instalação para individualização exige obras de adaptação na maioria das edificações multifamiliares. Para que a medição seja individualizada, é necessária a implantação de hidrômetros em cada ramal das colunas existentes (Figura 5a). Neste caso, ainda é preciso dispor de um lugar da área comum dos corredores para posicionar os medidores, ou a instalação de colunas específicas com hidrômetros individualizados para cada unidade autônoma (Figura 5b e Figura 5c). Além disso, no caso de prédios com muitos pavimentos, a reforma a ser realizada é de grande escala e muito cara [12].

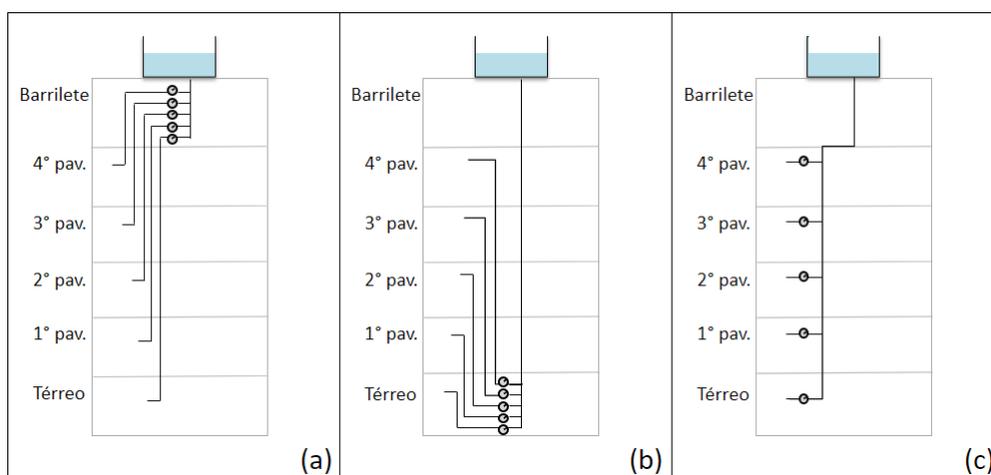


Figura 5 – Possíveis localizações dos hidrômetros [adaptado de 12]: (a) Posicionamento dos hidrômetros no pavimento cobertura; (b) Posicionamento dos hidrômetros no pavimento térreo; (c) Posicionamento dos hidrômetros nos andares da edificação.

Assim, havendo a disponibilidade de um medidor de vazão e/ou volume que pudesse ser mais facilmente integrado à instalação hidráulica já existente, isso contribuiria muito para a maior disseminação do SMI em prédios antigos.

Além disso, ressalta-se que, apesar do hidrômetro taquimétrico ser amplamente utilizado para medição de consumo hídrico, ele possui algumas limitações quanto às vazões máxima e mínima. Na máxima, a rotação excedente da turbina pode provocar danos, e na mínima, os atritos internos começam a afetar o movimento do mecanismo [25].

Dessa forma, a presente pesquisa buscou avaliar um novo tipo de hidrômetro que possa superar estas limitações, sabendo-se que alguns estudos apresentam a viabilidade de utilizar sensores resistivos para medição de volume, como XU *et al.* [26], que relatam uma forma de monitorar a vazão de água em dutos utilizando um filme resistivo flexível (Figura 6).

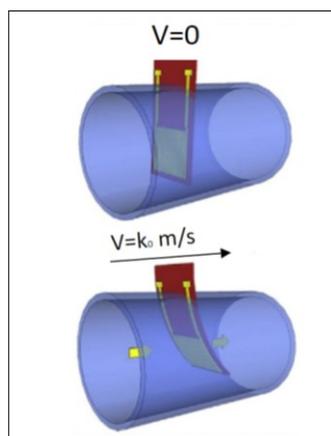


Figura 6 – Diagrama esquemático da curvatura do sensor resistivo, partindo do estado estático para a velocidade do fluxo de água ( $k_0$ ) em uma tubulação [26].

Outrossim, no que se diz respeito às normas sobre o projeto hidráulico, obras, aquisição, operação e manutenção dos equipamentos e acessórios necessários ao sistema de medição individualizada em edifícios antigos, o Brasil apresenta poucas diretrizes nacionais.

Frequentemente, a implementação do SMI de água nessas edificações fica sob a responsabilidade de empresas construtoras e/ou dos condomínios, ou seja, cada empresa realiza os projetos e as obras como julgarem mais adequados, conseqüentemente não há uma referência específica que estabeleça parâmetros técnicos e/ou defina um padrão de controle da qualidade dos serviços de instalação para prédios antigos, os quais são geralmente submetidos à obra de

grande porte com alto impacto vibracional na estrutura. Em prédios residenciais, a implementação do sistema requer intervenção hidráulica em todos os apartamentos, sendo que a energia da vibração oriunda da obra de um apartamento pode ser transmitida por toda a estrutura do prédio, chegando em alguns casos, a romper a tubulação interna já existente de outros apartamentos, causando transtornos e necessidade de obras de reparo maiores, com prejuízos adicionais para os proprietários.

Neste contexto, destaca-se que, embora sejam poucas as diretrizes identificadas para a implementação do SMI de água, existem algumas normas técnicas relacionadas que estas empresas podem adotar, tais como: ABNT NBR 15806:2010 e ABNT NBR 8194:2019. A Figura 7 apresenta as normas técnicas e os regulamentos técnicos metroológicos concernentes com a temática de medição individualizada.

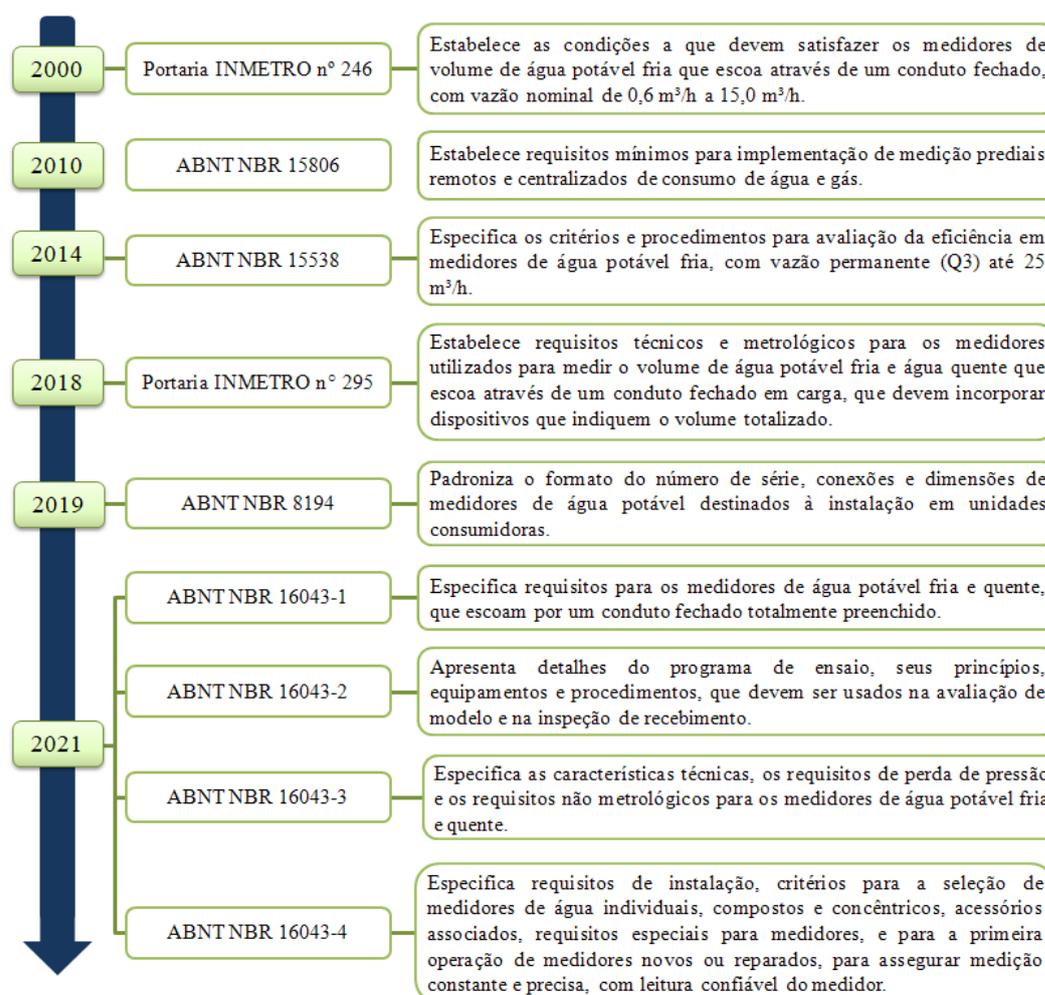


Figura 7 – Normas e Regulamentos técnicos.

Diante disso, observa-se que, mesmo na eventualidade de não haver uma legislação específica para o projeto hidráulico e para as obras de individualização dos medidores de consumo hídrico em prédios antigos, é possível considerar para fins de guia prático, documentos emitidos por algumas empresas de água e saneamento como, por exemplo, a Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A (Embasa), que fornecem orientações gerais sobre a medição individualizada de água (ANEXO A).

Em virtude dos aspectos mencionados anteriormente, a presente pesquisa empenhou-se em contribuir com a propagação da informação a respeito dos medidores individuais e com o avanço de diretrizes nacionais a respeito dos medidores individuais e, principalmente, investigar um novo tipo de hidrômetro, com o princípio de funcionamento baseado em um sensor resistivo de filme fino. De modo geral, buscou-se propor um medidor volumétrico para consumo de água residencial utilizando válvulas (registro geral, conforme mostrado na Figura 8) que já estão presentes na instalação hidráulica do edifício.

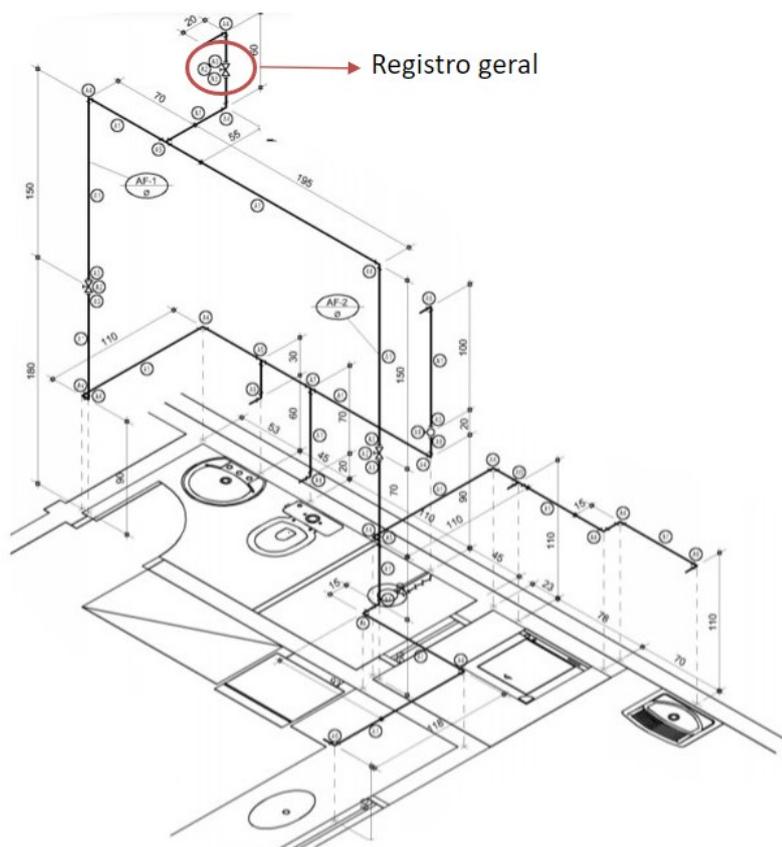


Figura 8 – Desenho esquemático das tubulações de água em um apartamento, destacando a válvula do registro geral [adaptado de 27].

### 1.3 Objetivos: geral e específicos

Nesta perspectiva, a presente pesquisa visou principalmente promover avanços no estudo sobre medidores de consumo de água utilizando sensores e técnicas de medição adaptadas para aplicação em medição de volume. De forma geral, objetivou-se pesquisar e desenvolver uma nova metodologia de medição de consumo de água, utilizando um sensor resistivo de filme fino, aproveitando válvulas (registro de gaveta) comumente presentes em sistemas hidráulicos, consequentemente dispensando a necessidade de obra em grande escala.

Os seguintes itens apresentam os objetivos específicos desta dissertação:

- Caracterizar eletromecânica e eletrotermicamente sensores resistivos de diferentes revestimentos para selecionar aquele mais adequado para a aplicação pretendida;
- Simular computacionalmente a flexão do *bend sensor* provocada pelo escoamento da água em uma tubulação por meio da Engenharia Assistida por Computador em duas etapas, para obter uma relação entre resistência e vazão: (i) simular via *Fluent Ansys* o escoamento da água dentro de uma tubulação para obter o valor da pressão; (ii) simular via *Mechanical Ansys* a deformação máxima do sensor ao aplicar a pressão calculada na etapa anterior;
- Simular computacionalmente o circuito eletrônico responsável pela alimentação e condicionamento dos sinais elétricos via software *LTSpice*<sup>®</sup> e treinar uma Rede Neural Artificial para, a partir do sinal elétrico de tensão, obter as vazões instantâneas;
- Validar as simulações realizadas anteriormente estimando o volume a partir das vazões de sistemas hidráulicos – através de dois meios diferentes – cálculo analítico e numérico;
- Desenvolver um projeto em *SpaceClaim Ansys* e definir o conceito do hidrômetro proposto demonstrando sua aplicabilidade na medição individualizada de volume de água em tubulações; e
- Sugerir orientações gerais para as empresas de água e saneamento sobre a individualização dos medidores de consumo de água em

unidades autônomas prediais e propor complementações às Normas e Regulamentos Técnicos do setor.

#### **1.4 Estrutura da dissertação**

Este trabalho possui uma divisão de 5 capítulos, incluindo esta introdução.

O capítulo 2 introduz conceitos básicos relacionados ao sensor resistivo de filme fino (*bend sensor*) e apresenta o desenvolvimento das metodologias para as caracterizações eletromecânica e térmica do sensor.

O capítulo 3 expõe o projeto feito no software Ansys do medidor volumétrico proposto utilizando o *bend sensor*, a simulação computacional via software Ansys para obtenção da relação entre a resistência do sensor e a vazão do escoamento de água em uma tubulação predial e a simulação do circuito eletrônico via software LTSpice<sup>®</sup> para obter um sinal com níveis adequados e uma boa relação sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*), ou seja, um sinal menos ruidoso. Além disso, apresentam-se também os fundamentos teóricos de Redes Neurais Artificiais.

O capítulo 4 mostra os resultados finais obtidos e as discussões.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações futuras do trabalho.

## 2 Sensor resistivo de filme fino – *Bend Sensor*

### 2.1. Princípio de funcionamento

O sensor resistivo de filme fino, esquematizado na Figura 9, é um sensor de flexão ou de curvatura (do inglês *flex sensor* ou *bend sensor*) que, conforme é flexionado, varia sua resistência elétrica. Isto ocorre devido à construção do sensor ser feita pela junção de uma única camada fina de um substrato de plástico com um material resistivo. Este tipo de sensor, ao ser curvado, separa esse material em diversas microfissuras que, dependendo do movimento de flexão, determina um aumento ou uma diminuição da condutividade elétrica do material [28], e o raio de curvatura ou da deflexão angular do sensor determina a resistência elétrica do sensor.

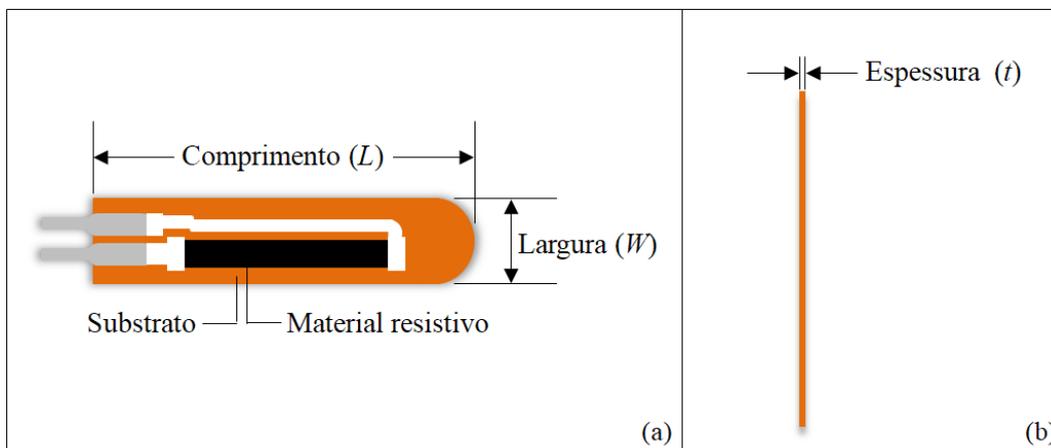


Figura 9 – Desenho esquemático do *bend sensor*: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.

Complementarmente, as características elétricas básicas do *bend sensor* são estabelecidas de acordo com o material resistivo, o substrato e o tipo de revestimento utilizados na sua construção. No que se refere ao conteúdo resistivo, tipicamente são empregados elementos de carbono ou polímeros. Já em relação às propriedades do substrato, elas, juntamente com o componente condutor, definem

a flexibilidade do sensor. Finalmente, quanto ao revestimento, o *bend sensor* pode não possuir nenhum tipo, como também, incluir algum tipo de revestimento, por exemplo, de borracha de silicone, de borracha adesiva, de poliéster ou de poliimida. Adicionalmente, o revestimento proporciona uma proteção química e mecânica ao sensor [29].

Para o desenvolvimento deste estudo foram utilizados seis sensores resistivos de filme fino do fabricante Flexpoint (Figura 10), com 0,28 polegadas (7,11 mm) de largura ( $W$ ) e 0,005 polegadas (0,127 mm) de espessura ( $t$ ).

Destes seis sensores, três tinham uma polegada de comprimento ( $L$ ) – dois com revestimento – um de poliéster e outro de poliimida – e um sem revestimento. Os outros três sensores tinham duas polegadas de comprimento ( $L$ ) e, assim como os anteriores, dois tinham os mesmos tipos de revestimento e um sem.

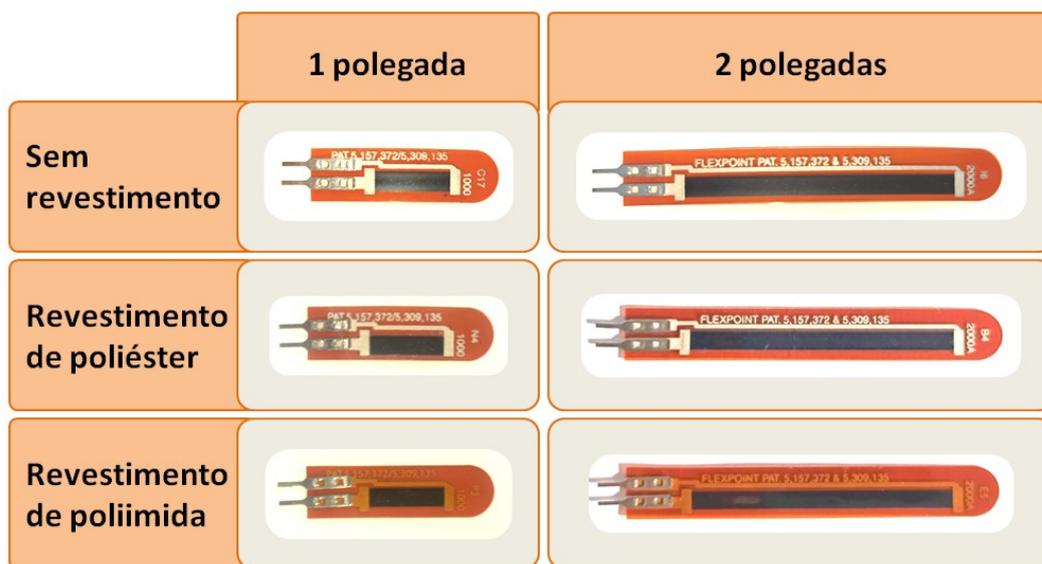


Figura 10 – *Bend sensors* de diferentes comprimentos e com distintos tipos de revestimentos.

Devido ao fato do *bend sensor* possuir propriedades eletromecânicas relevantes, o interesse de diversos pesquisadores torna-se crescente. Desta maneira, sua aplicação difunde-se em diversas áreas.

Grande parte dos estudos relacionados ao *bend sensor* encontra-se no setor da saúde, no qual este tipo de sensor é utilizado para diversos fins como, por exemplo, para medição das rotações de pequenas articulações do corpo; para avaliação da postura do tronco em doenças de coluna e acompanhamento de

reabilitação [30]; e para medições goniométricas semiautomáticas das capacidades de extensão das articulações dos dedos utilizando uma luva sensorial [31].

Adicionalmente, há estudos que mostram o sensor de flexão sendo utilizado para monitorar a postura do pescoço, em que o sistema lembra imediatamente o usuário de corrigir a postura do pescoço [32]; para supervisionar continuamente a saúde fetal – nos quais os sensores conectados à gestante detectam o movimento fetal [33]; para constituir uma prótese impressa em 3D [34]; para reconhecer e categorizar diferentes posturas sentadas relacionadas à saúde em uma cadeira de escritório [35]; e para reconstrução aproximada da geometria da superfície do sistema humano, podendo ser utilizada para medir a forma, registrar mudanças dinâmicas ou examinar o movimento deliberado para avaliar o corpo e o desempenho humano [36].

Além disso, o sensor resistivo de filme fino é utilizado para outras funcionalidades, como monitoramento do solo, no qual o sensor realiza a medição do assentamento e dos movimentos horizontais do solo de um modelo de declive arenoso em consequência ao teste de carregamento contínuo em um laboratório [37] e a detecção e localização de acidentes rodoviários em tempo real [38].

Por sua vez, o setor hídrico, distintamente das outras áreas, não apresenta muitos estudos utilizando o sensor de curvatura para medição de vazão. Contudo, alguns estudos demonstram a viabilidade e a aplicabilidade deste tipo de sensor para este fim. Como exemplos, Fan *et al.* [39] empregam o sensor para monitorar a velocidade do fluxo de ar em tempo real, contribuindo para economizar o consumo de energia em um processo de tratamento de águas residuais; Xu *et al.* [26] relatam uma maneira de monitorar a vazão de água em dutos utilizando um filme resistivo flexível; Srinivasan, Sen, Kumar e Saibabu [40] utilizam o sensor como viga engastada para a medição da vazão para aplicações de escoamento moderado; e Stewart, Fox e Harnett [41] desenvolveram um sensor de velocidade utilizando o *bend sensor* para aplicação em riachos.

Em suma, verifica-se que os sensores resistivos de filme fino apresentam inúmeras aplicações, nas mais diversas áreas, como médica, aeronáutica, automobilística, robótica e até mesmo em estudos de solo. Nos últimos anos, este tipo de sensor atraiu bastante a atenção dos pesquisadores por ser capaz de variar sua resistência quando flexionado, e também ser leve, robusto e de baixo custo. Estes sensores são facilmente adaptáveis em sistemas hidráulicos de unidades

autônomas (residencial, comercial ou mista) em edifícios. Além disso, é possível projetar e construir interfaces que resultam na junção eficaz de componentes eletrônicos com o *bend sensor*.

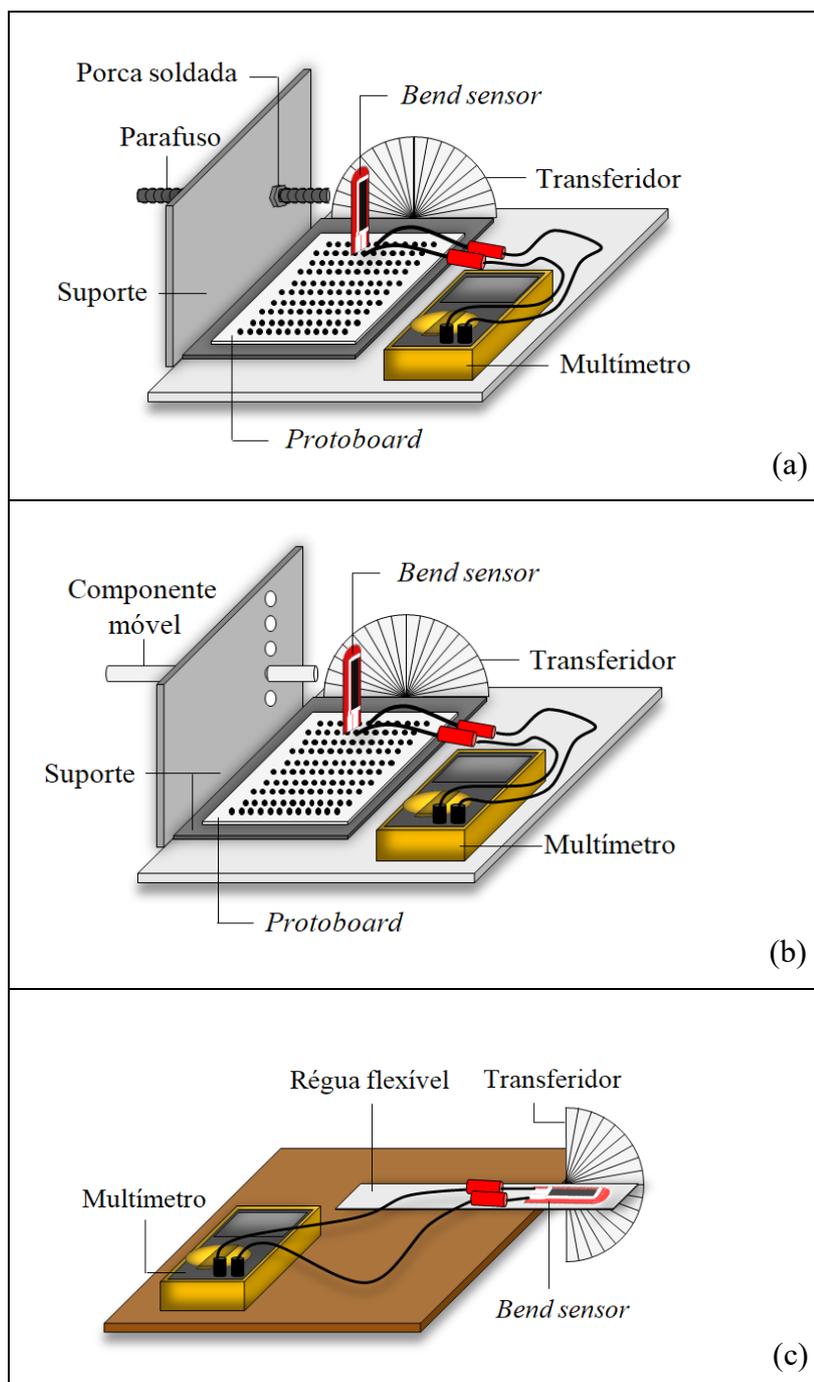
Levando em consideração todos os aspectos mencionados anteriormente, a presente pesquisa visou, primeiramente, conhecer melhor algumas propriedades do *bend sensor* e seu comportamento mediante flexão em diferentes ângulos dentro de um estudo explorativo, que buscou investigar a viabilidade de utilizá-lo para medição do consumo de água, tendo sido realizados dois tipos de caracterizações de sensores resistivos de filme fino. O primeiro método de caracterização buscou avaliar o comportamento eletromecânico do sensor, enquanto o segundo analisou as características eletrotérmicas do mesmo.

## 2.2. Caracterização eletromecânica

Visando relacionar a resistência do *bend sensor* com o ângulo de rotação, foram desenvolvidos e testados três métodos de caracterização simplificados. Para isso, desenvolveu-se uma bancada de testes composta por um *bend sensor* da Flexpoint, um multímetro digital portátil Keysight U1233A e um transferidor para medir o ângulo de curvatura do sensor. Além disso, cada método foi proposto com um mecanismo de flexão diferente. No ‘Método A’ (Figura 11a) a flexão foi realizada por um parafuso – guiado por uma rosca soldada na placa do suporte, que possibilitava um movimento unidirecional (apenas na horizontal). Em contrapartida, o ‘Método B’ (Figura 11b) utilizou um componente móvel para flexionar o *bend sensor*, podendo o movimento ocorrer de forma bidirecional (horizontal e vertical). Em ambos os métodos A e B o *bend sensor* foi fixado em um *protoboard*. No método denominado de C, o sensor foi posicionado e fixado sobre uma régua flexível, conforme mostrado na Figura 11(c), e flexionados manualmente régua e sensor como um componente único.

Vale destacar que, para cada método descrito, o ponto de contato entre o mecanismo de flexão e o sensor foi diferente. No ‘Método A’, por consequência do parafuso estar fixo na direção vertical e poder apenas se mover na direção horizontal, a cada flexão o ponto de contato entre o parafuso e o sensor foi diferente. Por sua vez, a possibilidade do componente móvel do ‘Método B’ poder

se mover tanto na direção vertical quanto na horizontal permitiu que o ponto de contato entre o mecanismo de flexão e o sensor fosse sempre o mesmo a cada flexão. Por outro lado, como no ‘Método C’ o sensor foi fixado na régua e apenas a ponta dela (sem sensor) foi diretamente flexionada, não houve contato entre o mecanismo de flexão (mão) e o sensor.



PUC-Rio - Certificação Digital N° 2012414/CA

Figura 11 – Desenho esquemático das metodologias da caracterização eletromecânica dos sensores resistivos de filme fino: (a) Método A; (b) Método B; (c) Método C.

Na caracterização eletromecânica, como mencionado anteriormente, foram caracterizados seis sensores com diferentes tamanhos – 1 polegada e 2 polegadas – e distintos revestimentos – com poliéster, com poliimida e sem revestimento. A metodologia do ensaio de caracterização dos modelos foi a seguinte:

(i) O *bend sensor* foi flexionado pelo mecanismo de flexão de cada *setup*, realizando-se um ciclo em duas etapas, a primeira de “carregamento” do sensor e a segunda de “descarregamento”. Com isso, obteve-se a curva de histerese e calculou-se a máxima histerese de cada sensor.

Para o:

- ‘Método A’: o sensor foi flexionado pelo parafuso, variando o ângulo de deflexão dentro de uma faixa de 0° (resistência de referência) até 60° – para o sensor de 1 polegada – e até 70° – para o sensor de 2 polegadas – com passo de 10°;
- ‘Método B’: o sensor foi flexionado pelo componente móvel, variando o ângulo de deflexão dentro de uma faixa de 0° (resistência de referência) até 60° – para o sensor de 1 polegada – e até 70° – para o sensor de 2 polegadas – com passo de 10°;
- ‘Método C’: como o *bend sensor* estava fixado na régua, ele foi flexionado conforme a régua foi curvada manualmente até o ângulo de rotação desejado, que variou dentro de uma faixa de 0° (resistência de referência) até 90° com passo de 10°;

(ii) Em ambas as etapas, a cada variação de ângulo, dez medições de resistência do *bend sensor* foram realizadas, para obtenção da média; e

(iii) Por fim, a partir da resistência média – entre os valores no incremento e decremento do ângulo – obtiveram-se equações de regressão e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) via software Excel<sup>®</sup> para cada sensor em cada método.

A seção 4.1.1 apresenta os resultados da caracterização eletromecânica.

### 2.3. Caracterização eletrotérmica

A segunda caracterização foi realizada com a finalidade de verificar a influência da temperatura na resistência do *bend sensor* e, também, avaliar a histerese deste sensor em relação ao efeito da temperatura.

Nesta caracterização foram utilizados: uma câmara climática do fabricante THERMOTRON, modelo SM-8-82000 (Figura 12a) – que foi programada para realizar um aquecimento com temperaturas variando de 20 °C até 40 °C, com passo de 5 °C, e um resfriamento de 40 °C até 20 °C, com passo de 5 °C – o mesmo *setup* do ‘Método A’, descrito na seção 2.2 (Figura 12b) e um multímetro digital portátil Keysight U1233A (Figura 12c).



Figura 12 – (a) Câmara climática THERMOTRON; (b) Setup com o *bend sensor* posicionado dentro da câmara climática; (c) Multímetro localizado na parte externa da câmara para medição da resistência do sensor.

Para obter os valores da resistência, o *setup* foi colocado dentro da câmara climática e o sensor foi curvado com o parafuso nos ângulos de 0° (repouso), 10°, 30° (Figura 13), 50° e 70° (Figura 13).

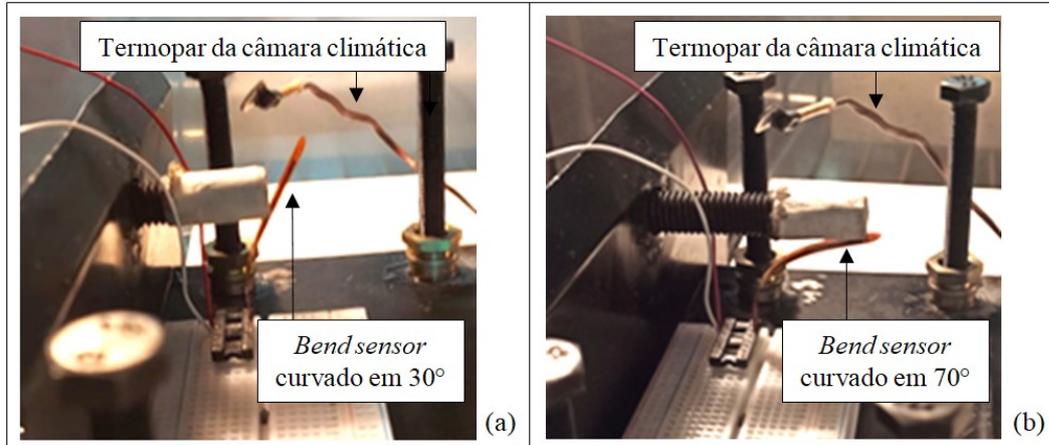


Figura 13 – Variação do ângulo de rotação: (a) Sensor curvado em 30°; (b) Sensor curvado em 70°.

Adicionalmente, para cada ângulo realizou-se o ciclo programado e, conforme as temperaturas desejadas foram atingidas, dez medições de resistência do *bend sensor* foram realizadas, para obter-se um valor médio.

A seção 4.1.2 apresenta os resultados da caracterização eletrotérmica.

### 3 Projeto do medidor volumétrico

Neste capítulo será detalhado o conceito do medidor volumétrico proposto nesta dissertação de mestrado, bem como seu princípio de funcionamento.

#### 3.1. Conceito do medidor

A proposta do hidrômetro – baseado em um sensor resistivo de filme fino para medição de consumo de água em unidades autônomas – consiste, principalmente, em utilizar as válvulas de controle de fluxo que já estão presentes na instalação hidráulica do edifício, conforme mencionado na seção 1.2.

Então, a proposta é inserir o *bend sensor* na válvula para que a mesma seja adaptada de modo a funcionar como um medidor volumétrico, utilizando a própria estrutura mecânica da válvula, especialmente a cunha – o componente mecânico emborrachado responsável pela liberação (válvula aberta) e bloqueio (válvula fechada) da passagem do fluido.

A Figura 14 apresenta uma válvula de controle de fluxo, do tipo gaveta: na Figura 14(a) a válvula está fechada (cunha obstruindo a passagem), impedindo que o escoamento ocorra, e na Figura 14(b) a válvula está aberta (cunha recolhida), com o sensor posicionado em seu interior, permitindo a passagem e a medição do escoamento.

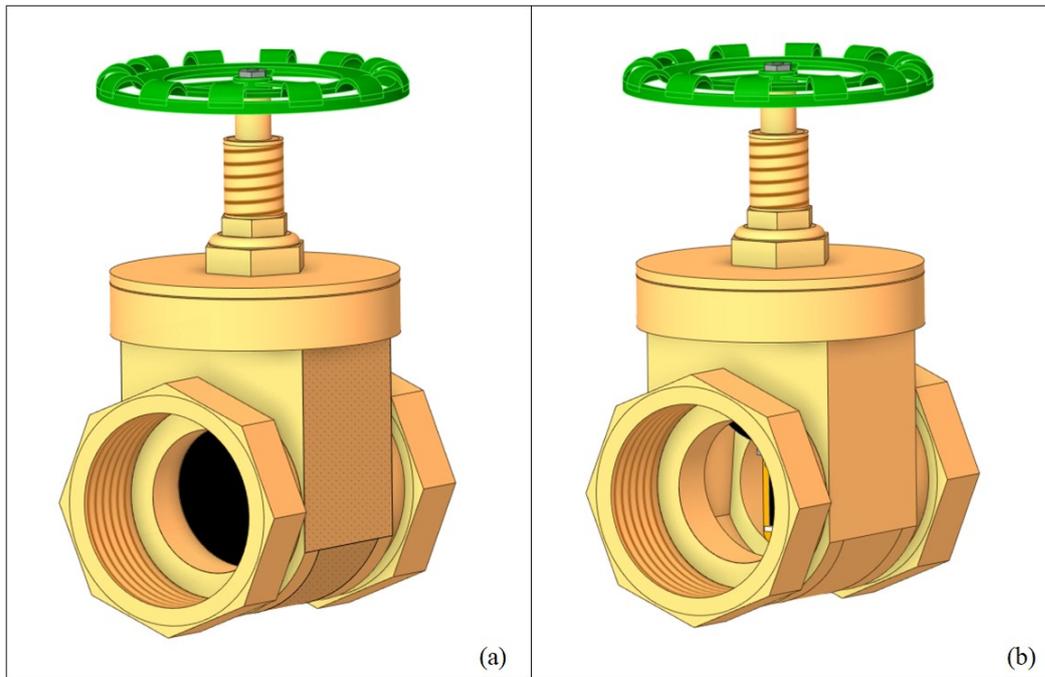


Figura 14 – Desenho 3D da válvula gaveta: (a) Fechada; (b) Aberta.

Por sua vez, a Figura 15(a) apresenta a vista lateral da válvula gaveta aberta (com a cunha recolhida) e o sensor posicionado em seu interior, ao passo que a Figura 15(b) apresenta esta mesma configuração, sem a carcaça que conecta na tubulação, apenas a tampa da válvula com a cunha toda recolhida, para melhor visualização do interior da válvula.

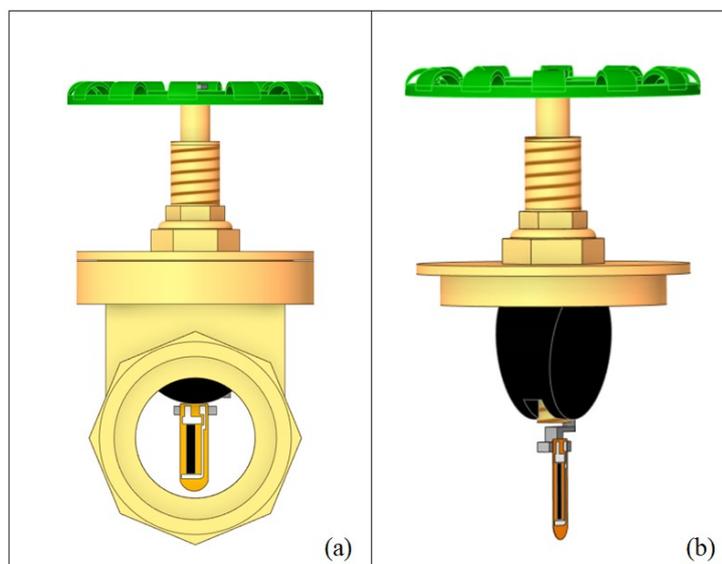


Figura 15 – (a) Vista lateral da válvula gaveta aberta com o *bend sensor*; (b) Tampa da válvula com a cunha toda recolhida.

Para a adaptação da válvula como medidor volumétrico, propõe-se a inserção de uma peça fixa adicional (peça cinza) dentro da tampa (Figura 16a) de modo a funcionar como suporte para o *bend sensor* a ser posicionado no interior da válvula. Para a fixação do sensor nesta peça em uma avaliação inicial e laboratorial da proposta do medidor, sugere-se utilizar resina epóxi, por ser altamente resistente e endurecer até na água, assim como feito no estudo de Xu *et al.* [26], mas destaca-se a necessidade de fixar o sensor de outra maneira quando o medidor volumétrico proposto for utilizado para medição do consumo de água devido à toxicidade da resina epóxi. Além disso, em termos práticos, visando padronizar o modelo de medidor proposto, seria necessária a fabricação de uma cunha com um furo na lateral para a passagem da peça cinza e uma abertura no centro para haver espaço para o sensor, assim como apresentado na Figura 16(b).

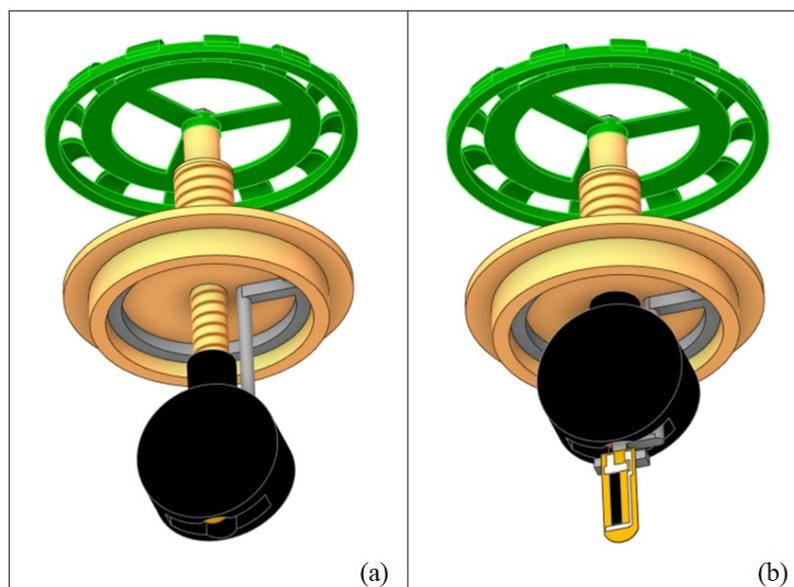


Figura 16 – Tampa da válvula gaveta com a cunha de borracha adaptada com o sensor fixado na peça cinza: (a) Válvula fechada; (b) Válvula aberta.

Nas próximas seções, o princípio de funcionamento do medidor proposto será simulado computacionalmente.

### 3.2. Simulação em Ansys

Com o propósito de analisar computacionalmente a flexão do *bend sensor* provocada pelo escoamento da água em uma tubulação, fez-se necessário um estudo por meio de uma simulação utilizando Engenharia Assistida por Computador (CAE, do inglês *Computer Aided Engineering*) via software Ansys, por meio de um sistema desacoplado, ou seja, primeiro realizou-se uma simulação no *Fluent Ansys* do escoamento da água dentro de uma tubulação para obter o valor da pressão (Figura 17a) e, após isto, efetuou-se outra simulação no *Mechanical Ansys* para obter a deformação máxima do sensor ao se aplicar a pressão calculada na etapa anterior (Figura 17b).

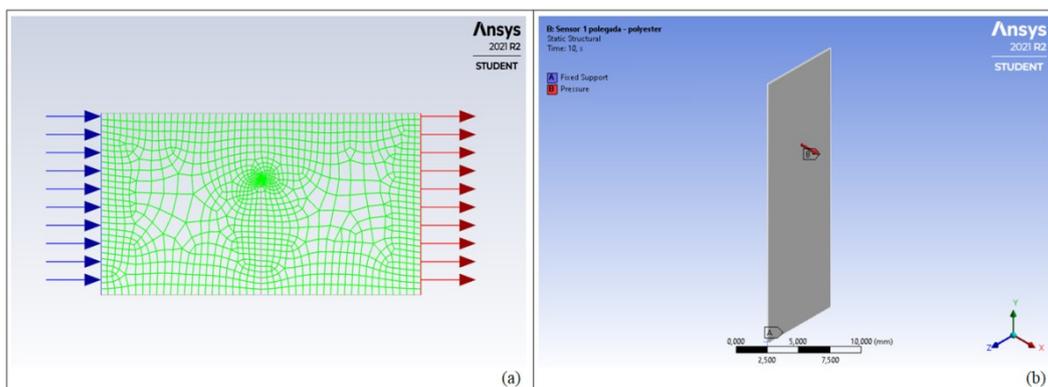


Figura 17 – Simulação no Ansys: (a) Do escoamento da água no *Fluent*; (b) Da flexão do sensor resistivo no *Mechanical*.

No que diz respeito à simulação do escoamento da água através de uma tubulação, realizou-se uma simulação numérica de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*), que pode ser dividida em três etapas:

1. Geração da geometria e malha, configurando parâmetros do escoamento, condições iniciais e de contorno;
2. Obtenção da solução numérica; e
3. Visualização e análise dos resultados.

Neste estudo, as etapas citadas acima foram realizadas no software Ansys. A primeira foi feita no *SpaceClaim*, a segunda no *Fluent* e a terceira no *CFD-Post*. Além disso, a geração das malhas foi realizada utilizando o comando “*Edge Sizing*” e o tipo “*Number of Divisions*”, ou seja, para o dimensionamento das bordas das geometrias, elas foram divididas em partes iguais.

Adicionalmente, com vistas a configurar a simulação, foi necessário calcular o número de Reynolds ( $Re$ ), conforme a equação (1), que é utilizado para determinar o regime de escoamento de determinado fluido. Este regime pode ser classificado em laminar ou turbulento, dependendo do número de Reynolds. Em escoamentos internos, valores de  $Re$  menores que 2300 são considerados escoamentos laminares e maiores que este valor são escoamentos turbulentos.

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu}, \quad (1)$$

onde  $\rho$  e  $\mu$  são a massa específica e viscosidade dinâmica do fluido, respectivamente,  $U$  é a velocidade média do fluido e  $D_h$  é o diâmetro hidráulico, definido por

$$D_h = \frac{4 A}{P}, \quad (2)$$

onde  $A$  e  $P$  são, respectivamente, a área transversal e o perímetro molhado no qual ocorre o escoamento.

As velocidades utilizadas para a simulação do escoamento foram escolhidas a partir de dados históricos obtidos em medições realizadas com um medidor de vazão ultrassônico e uma tubulação de 1 ½” de diâmetro, tipicamente utilizada em sistemas hidráulicos de unidades autônomas em edifícios, e estas velocidades variam entre 0,0502 m/s e 0,5307 m/s. A Tabela 1 apresenta alguns dados utilizados na simulação do sensor resistivo com uma polegada de comprimento e a Tabela 2 do sensor com duas polegadas, e ambas as tabelas apresentam dados para o cálculo do número de Reynolds. Além disso, o fluido utilizado na simulação foi

a água (ou seja,  $\mu = 1,003 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  e  $\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) – sem considerar o ar que comumente está presente nas tubulações.

Tabela 1 – Dados utilizados na simulação CFD do *bend sensor* com uma polegada de comprimento.

Parâmetros	Valor	Unidade
Diâmetro interno	1 ½	polegada
	0,0381	m
Área $A$	0,00114	m <sup>2</sup>
Perímetro molhado $P$	0,1197	m
Diâmetro hidráulico $D_h$	0,0381	m
número de Reynolds	máx.	21 992
	mín.	5 688

Tabela 2 – Dados utilizados na simulação CFD do *bend sensor* com duas polegadas de comprimento.

Parâmetros	Valor	Unidade
Diâmetro interno	2 ½	polegadas
	0,0635	m
Área $A$	0,00317	m <sup>2</sup>
Perímetro molhado $P$	0,1995	m
Diâmetro hidráulico $D_h$	0,0635	m
número de Reynolds	máx.	16 115
	mín.	3 792

Complementarmente, a fim de gerar o campo de velocidades e obter o valor da pressão, foi preciso escolher o modelo de escoamento adequado à simulação. Então, como para todas as velocidades o número de Reynolds foi superior a 2300, configurando assim um escoamento turbulento, o modelo de turbulência utilizado foi o Transporte de Tensão de Cisalhamento (SST, do inglês *Shear Stress Transport*).

No que tange à simulação via *Mechanical Ansys*, o sensor foi considerado de forma análoga a uma viga (Figura 18a). Neste sentido, conceitualmente, a deflexão  $v$  é o deslocamento de qualquer ponto no eixo da viga na direção  $y$  (Figura 18b). Quando ocorre a flexão da viga, além de haver uma flexão em cada ponto ao longo da viga, há, também, uma rotação, na qual o ângulo de rotação  $\theta$  do eixo da viga é o ângulo entre o eixo  $x$  e a tangente à curva de deflexão (Figura 18b) [42].

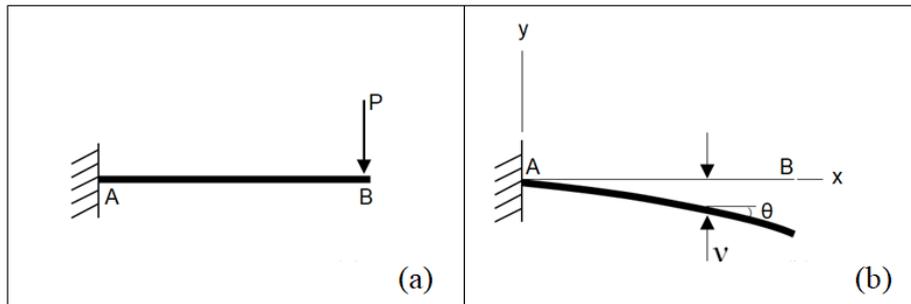


Figura 18 – Curva de flexão de uma viga engastada [adaptado de 42]: (a) Viga engastada; (b) Viga flexionada.

Considerando uma viga engastada submetida a um carregamento uniforme de intensidade  $q$ , como mostrado na Figura 19(a), a deflexão máxima ( $\delta$ ) e o ângulo de rotação máximo ( $\theta$ ) ocorrem na extremidade livre da viga (Figura 19b).

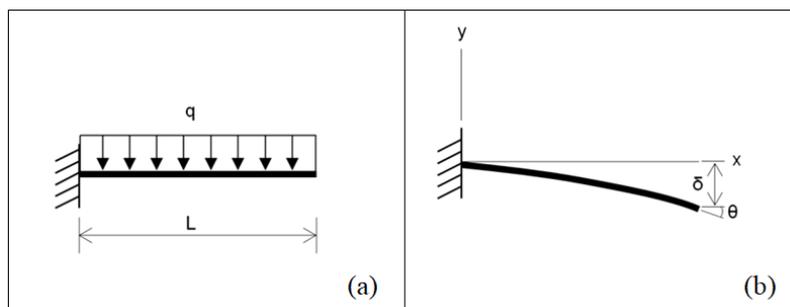


Figura 19 – Viga engastada: (a) Submetida a um carregamento uniforme; (b) Deflexão máxima da viga [adaptado de 42].

Estes parâmetros –  $\delta$  e  $\theta$ , que ocorrem na extremidade livre da viga – podem ser calculados utilizando as equações (3) e (4), respectivamente.

$$\delta = \frac{qL^4}{8EI}, \quad (3)$$

$$\theta = \frac{qL^3}{6EI}, \quad (4)$$

onde  $L$  é o comprimento da viga e  $EI$  é a rigidez de flexão.

Então, nesta simulação o *bend sensor* foi considerado como uma viga engastada submetida a um carregamento uniforme. Desse modo, o método

utilizado foi a Análise por Elementos Finitos (FEA, do inglês *Finite Element Analysis*). A geração da geometria e a configuração dos parâmetros do sensor, bem como suas dimensões (mostradas na Figura 9 da seção 2.1) e o tipo de revestimento (poliéster, com densidade igual a  $1380 \text{ kg/m}^3$ , módulo de elasticidade igual a  $3,65 \text{ GPa}$  e coeficiente de Poisson igual a  $0,48$  [43]), foram realizadas pelo *Workbench* do Ansys.

Além disso, objetivando-se configurar a simulação estrutural, a pressão utilizada para ser aplicada no sensor foi a obtida pela simulação do escoamento. Com isso, foi possível conhecer a deformação máxima correspondente a cada velocidade e, conseqüentemente, o ângulo máximo de deflexão do sensor.

Por fim, após a obtenção destes resultados, e utilizando a equação de regressão obtida na caracterização eletromecânica (resistência em função do ângulo de deflexão, mencionada na seção 2.2), foi possível estimar as resistências para cada ângulo oriundo da simulação ( $R_S$ ).

A seção 4.2 apresenta os resultados da simulação em Ansys.

### **3.3. Circuitos eletrônicos de leitura**

Posteriormente, para compor e avaliar o funcionamento do hidrômetro proposto, realizou-se uma simulação computacional em LTSpice® de um circuito eletrônico responsável pela alimentação e condicionamento dos sinais elétricos, gerando uma tensão de saída relacionada à vazão no registro de gaveta.

Com o propósito de realizar uma simples conversão de deflexão em tensão, o *bend sensor* foi ligado a um resistor em uma configuração de divisor de tensão, que é um circuito básico e fundamental na engenharia eletrônica, fracionando uma tensão elétrica de entrada. A configuração mais simples utiliza apenas dois resistores em série ( $R_1$  e  $R_2$ ) e uma tensão de entrada ( $V_{in}$ ), gerando, assim, uma tensão de saída ( $V_{out}$ ) que é uma fração da entrada, conforme apresentado na Figura 20.

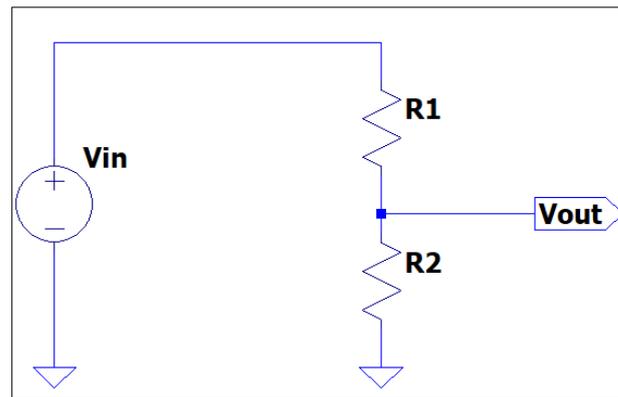


Figura 20 – Circuito do divisor de tensão.

Conceitualmente, a formulação da equação que descreve o divisor de tensão é obtida por meio da Lei de Ohm (equação 5).

$$V = R \cdot i, \quad (5)$$

onde  $V$  é a diferença de potencial elétrico (tensão),  $R$  é a resistência elétrica e  $i$  é a corrente elétrica.

Adicionalmente, como as resistências são colocadas em série, a corrente que passa nos dois resistores é a mesma. Então, combinando a equação desta corrente com a tensão de saída, obtém-se a equação que representa o divisor de tensão:

$$V_{out} = R_2 \cdot \left( \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} \right), \quad (6)$$

Para que um determinado sinal elétrico de tensão tenha níveis adequados e uma boa relação sinal-ruído, ou seja, menor efeito do ruído de fundo sobre a medição do sinal, é preciso que ele passe por alguns processos, como amplificação, filtragem e linearização.

A amplificação é feita para amplificar sinais elétricos de baixa intensidade, objetivando aumentar a resolução e diminuir o ruído [44]. Exemplos clássicos são o amplificador inversor e o amplificador não-inversor, ambos baseados no amplificador operacional, também denominado de ampop.

Por sua vez, a linearização é outra função comum do condicionamento de sinal. Como o próprio nome sugere: ela transforma uma resposta não-linear em uma linear.

Para configurar adequadamente o circuito do *bend sensor* utilizaram-se as resistências ( $R_S$ ) obtidas a partir da simulação realizada no software Ansys, apresentada na seção 3.2. Além disso, via função Solver do software Excel<sup>®</sup>, foi realizada outra regressão exponencial (equação 7) para obter-se uma relação entre a resistência da simulação ( $R_S$ ) e a vazão – que foi calculada pela multiplicação da velocidade do escoamento e a área da seção transversal da tubulação.

$$R(\dot{q}) = R_0 + Ae^{\alpha(\dot{q}-\dot{q}_0)}, \quad (7)$$

onde  $R_0$  é a resistência inicial,  $\dot{q}$  é a vazão instantânea correspondente à deflexão do sensor e  $\dot{q}_0$  é a vazão inicial.

Na simulação em LTSpice<sup>®</sup>, visando obter um sinal de tensão em função da vazão, inicialmente criou-se um componente que simula o comportamento resistivo do *bend sensor*, conforme a Figura 21 expõe.

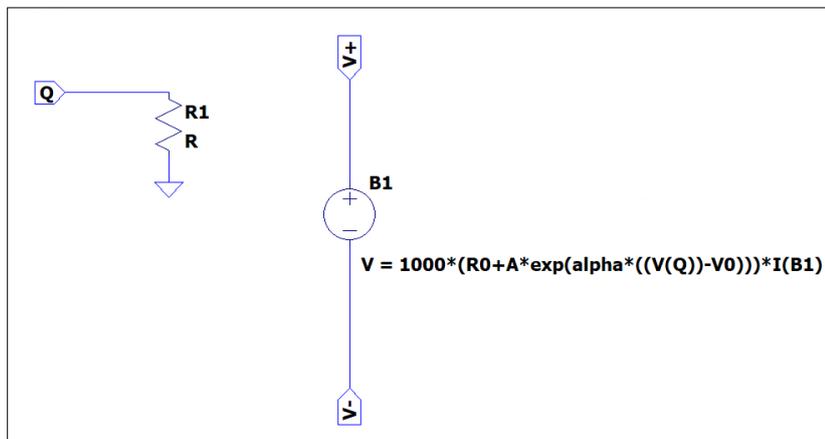


Figura 21 – Componente que simula o comportamento resistivo do *bend sensor* no LTSpice<sup>®</sup>.

O componente B1 é uma fonte controlada de tensão (*behavioral voltage source*), que é controlada pela tensão aplicada no terminal de entrada “Q”. A expressão que define a tensão gerada por B1 tem dois componentes. O primeiro corresponde à relação entre a vazão (representada no simulador pela tensão

aplicada no terminal de entrada “Q”) e a resistência do *bend sensor*. O segundo componente é a corrente elétrica que flui através do próprio componente B1. Assim, ao se conectarem outros componentes eletrônicos aos terminais “V+” e “V-“, esta fonte controlada B1 comporta-se como um resistor (cuja resistência varia com a vazão). A expressão utilizada é um exemplo da relação entre vazão e resistência, conforme será apresentado no Capítulo 4.

Posteriormente, este componente foi utilizado no circuito eletrônico que possui processos como deslocamento, linearização e amplificação. A Figura 22 apresenta como foi realizada a simulação do circuito eletrônico nesta dissertação: (i) o sinal gerado pela simulação do sensor resistivo (X1) passou pelo divisor de tensão, gerando, assim, um sinal de saída em tensão (além disso, o valor da resistência R1 da Figura 22 foi escolhido de forma a maximizar a faixa de sensibilidade de deflexão desejada); (ii) após isso, este sinal passou pelos processos de deslocamento, amplificação e linearização. Com isso, a simulação gerou um sinal elétrico de tensão em função da vazão com níveis adequados e boa relação sinal-ruído, ou seja, com um reduzido efeito do ruído de fundo sobre a medição do sinal, conforme mencionado anteriormente.

PUC-Rio - Certificação Digital N° 2012414/CA

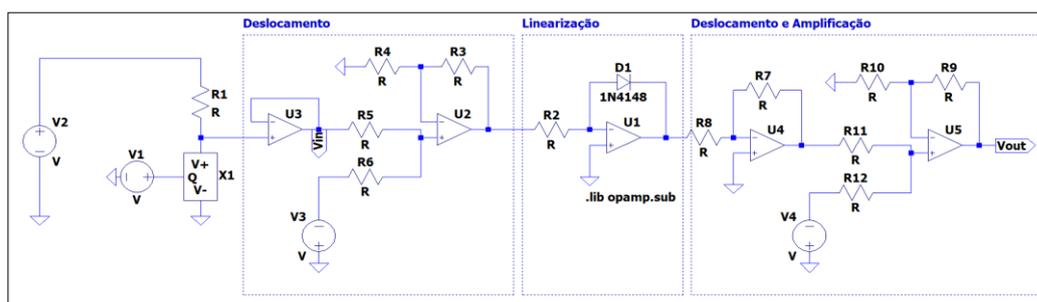


Figura 22 – Configuração do circuito eletrônico no LTSpice®.

Desta maneira, o sistema completo forneceu uma tensão de saída do circuito (variável de saída), que corresponde a uma determinada vazão instantânea (variável de entrada). A seção 4.3 apresenta os resultados desta simulação em LTSpice®.

Contudo, para esta pesquisa, necessita-se estimar a vazão a partir desta tensão elétrica. Como as tentativas de regressão não-linear entre vazão e tensão

elétrica não geraram bons resultados, optou-se pela utilização da ferramenta de inteligência computacional denominada Redes Neurais Artificiais (RNAs).

### 3.4. Redes Neurais Artificiais (RNAs)

Em 1943, os primeiros conceitos sobre rede neural artificial foram introduzidos pelo Warren S. Mcculloch e Walter Pitts [45], que propuseram um modelo de inteligência artificial análogo à forma, ao comportamento e às funções de um neurônio biológico (Figura 23a). Ou seja, no neurônio artificial (Figura 23b), os sinais de entrada e os pesos correspondem, respectivamente, no neurônio biológico, aos dendritos e às sinapses – que é a ligação de um dendrito com o corpo celular. Além disso, o processamento dos estímulos que equivale à função soma ocorre no corpo celular e a função de ativação representa o limiar de disparo do neurônio biológico [46].

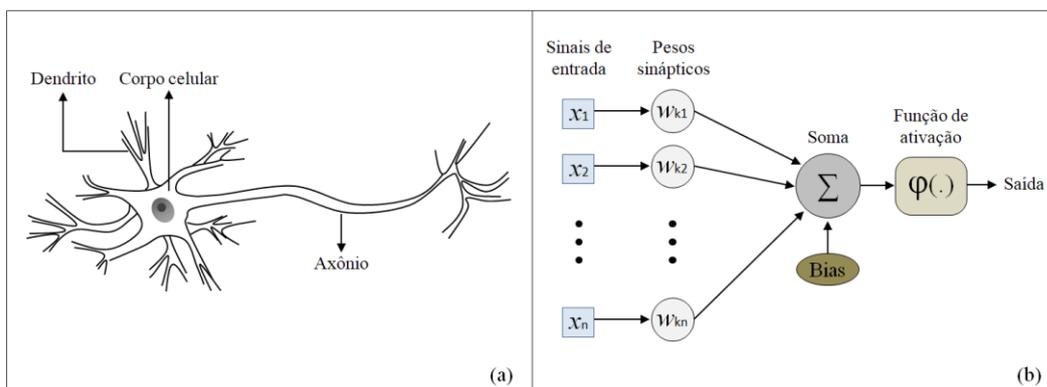


Figura 23 – Neurônio: (a) Biológico; (b) Artificial [adaptado de 46].

Basicamente, basta combinar inúmeros neurônios artificiais para obter-se a chamada rede neural artificial. Uma de suas finalidades mais relevantes é o desenvolvimento de uma relação entre variáveis independentes (entrada) e dependentes (saída), que é determinada utilizando um processo de aprendizagem, no qual é fornecido à rede um conjunto de dados. Destaca-se também o fato da RNA ser um modelo que não precisa ser orientado pelas leis físicas, ou seja, os seus parâmetros não precisam ter nenhum significado físico [47].

Adicionalmente, as RNAs possuem um tempo computacional reduzido, alta precisão e a capacidade de gerar relações não-lineares entre as variáveis independentes e dependentes de um sistema. Assim, além de realizar a aproximação de funções, as RNAs são capazes de desempenhar reconhecimento de padrões, previsões e processamento de imagens, possibilitando sua aplicação em inúmeras áreas [47]. Como exemplo, em sistemas de energia solar, a fim de prever: a temperatura interna do ar e do telhado e a energia perdida em uma estufa semissolar a partir de alguns dados climáticos externos e internos no leste do Azerbaijão [48]; o desempenho térmico do aquecedor de ar solar de leito poroso de fluxo unidirecional [49]; a eficiência termodinâmica do sistema de aquecedor solar de água [50]; e o desempenho do secador de túnel solar [51]. As RNAs são utilizadas também para classificação e reconhecimento facial [52–54], para criação de modelos para previsão da condição de pavimentos aeroportuários [55]; e para estudos do mercado de ações [56–59].

Além disso, estão presentes em pesquisas relacionadas a sistemas hídricos, como exemplos, na detecção e reconhecimento de vazamentos em tubulações [60, 61]; na avaliação do índice da qualidade de água no Mar Vermelho, Sudão [62] e no rio Godavari, Índia [63]; e na previsão da eficiência da remoção de metais pesados de soluções aquosas de sistemas de biocarvão [64].

Em suma, essas múltiplas aplicações são consequências das várias possibilidades de configuração das redes neurais artificiais que podem ser caracterizadas em relação: ao padrão de conexões entre as unidades (estrutura), ao método de aprendizagem e à função ativação [65].

No que diz respeito à estrutura, as RNAs podem ser classificadas como Redes Feedforward de uma única camada ou de múltiplas camadas e Redes Recorrentes. As redes feedforward diferenciam-se das recorrentes por não possuírem um laço de recorrência.

No que tange ao método de aprendizagem, o modelo de treinamento é estabelecido pela maneira em que os parâmetros são modificados, podendo ser supervisionada, não-supervisionada e por reforço. Na supervisionada, o conjunto de dados de entrada e de saída são conhecidos, porém, o ambiente não, ou seja, o ajuste dos parâmetros da rede é feito pela associação do sinal de entrada com um sinal de erro (diferença entre o sinal de saída desejada e a fornecida pela rede).

Em contrapartida, a não-supervisionada não requer o valor desejado de saída da rede – o sistema coleta propriedades do conjunto de padrões, agrupando-os em classes inerentes aos dados. Diferentemente, o sistema de treinamento por reforço aprende a realizar uma determinada tarefa apenas baseando-se nos resultados de sua experiência com uma interação com o ambiente [65]. Adicionalmente, é possível validar o modelo de treinamento utilizando diversos algoritmos, por exemplo, a validação cruzada que é uma ferramenta padrão estatística que utiliza um conjunto de dados diferente dos que foram utilizados para ajustar os parâmetros da rede, ou seja, o conjunto de dados é dividido aleatoriamente em dois conjuntos: de treinamento – que subdivide-se em estimação (utilizado para selecionar o modelo) e validação (utilizado para testar ou validar o modelo) – e teste [46].

Por outro lado, em relação à função de ativação existem diversos tipos, os mais utilizados são: função de etapa binária, função linear, sigmoide, tanh, ReLU e função de base radial (RBF).

Diante disso, considerando-se todas as informações mencionadas sobre RNAs, para fins desta pesquisa optou-se por utilizar uma rede *feedforward* com aprendizagem supervisionada e a função de base radial como função de ativação (duas camadas). Adicionalmente, conforme apresentado na seção 3.3, o sistema simulado no LTSpice<sup>®</sup> gerou um sinal de tensão do *bend sensor* como saída tendo um sinal de vazão como entrada, porém para o propósito deste estudo, torna-se fundamental que a vazão seja a variável de saída. Sendo assim, a RNA foi utilizada para obtenção do sinal de vazão (*output*) em função da tensão (*input*). Este treinamento (Apêndice A) foi realizado através do comando *newrbe* do Matlab (Figura 24) – os parâmetros de entrada foram as tensões elétricas simuladas pelo LTSpice<sup>®</sup> e de saída as vazões desejadas e, com isso, foi possível obter uma rede treinada que, ao receber os valores de tensão, estima os valores de vazão instantânea.

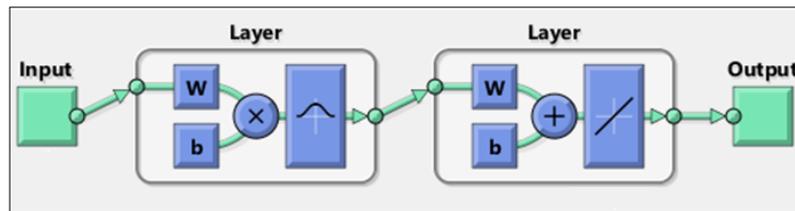


Figura 24 – Esquema do Matlab da rede neural artificial com função de base radial.

A seção 4.3 apresenta os resultados das RNAs.

Por fim, visando uma validação simulada do conceito de medição proposto com o sensor resistivo de filme fino, realizou-se uma estimativa de volume por diferentes meios, conforme apresentado na seção 3.5.

### 3.5. Simulação da Operação do Medidor

Partindo do princípio que o hidrômetro deve medir o volume total de água consumida por uma unidade autônoma, entende-se que o medidor proposto neste trabalho necessita estimar o volume a partir da vazão instantânea.

Além disso, considerando a realidade das tubulações prediais, sabe-se que só há fluxo de água em alguns momentos, como ao se acionar uma descarga ou se abrir uma torneira. Portanto, de forma a validar as simulações realizadas do hidrômetro proposto baseado em um sensor resistivo, geraram-se dois casos diferentes de pulsos trapezoidais de vazão saindo do zero (sem fluxo de água na tubulação) e chegando a um determinado valor de vazão, que depende de qual sistema hidráulico foi acionado – nesta pesquisa foram consideradas uma torneira e um chuveiro convencional do fabricante Docol. Adicionalmente, para ser mais realista, incluíram-se pequenas flutuações na vazão máxima do pulso trapezoidal, e foram considerados um acionamento de 15 segundos da torneira e um banho de 15 minutos utilizando o chuveiro convencional.

Com vistas a configurar o pulso trapezoidal, considerou-se um edifício de 12 andares, e duas unidades autônomas, uma no quarto andar e outra no décimo primeiro andar. Vale ressaltar que como, em média, cada andar tem três metros de altura, a unidade no quarto andar possui 24 metros de coluna d'água (m.c.a.) e a no décimo primeiro possui 3 m.c.a. Logo, as curvas de vazão da torneira (Figura

25, Anexo B) e do chuveiro tradicional (Figura 26, Anexo C), fornecidas pelo próprio fabricante, foram utilizadas para extrair os valores de vazão para gerar o pulso trapezoidal.

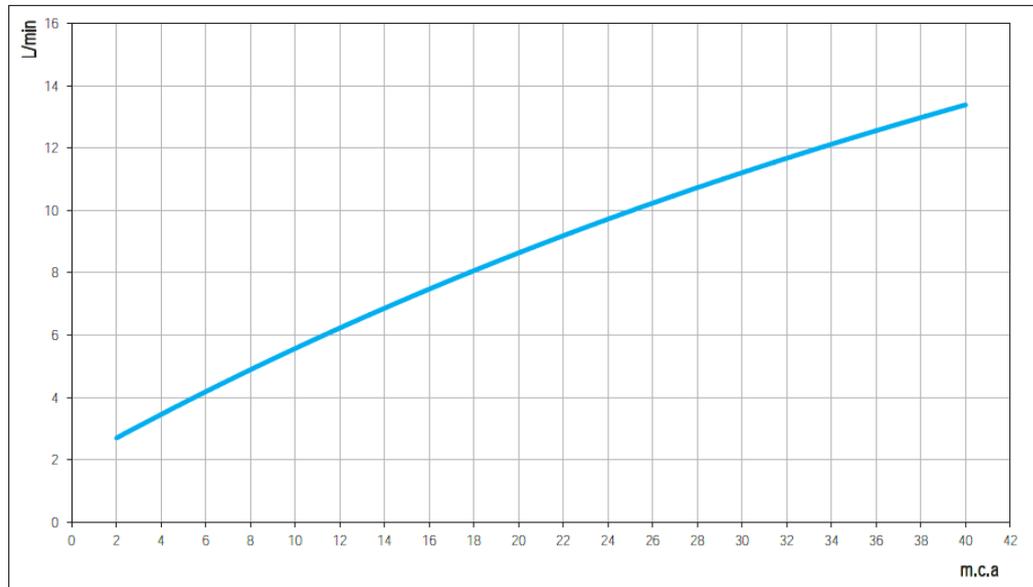


Figura 25 – Curva de vazão da torneira do fabricante Docol [Anexo B].

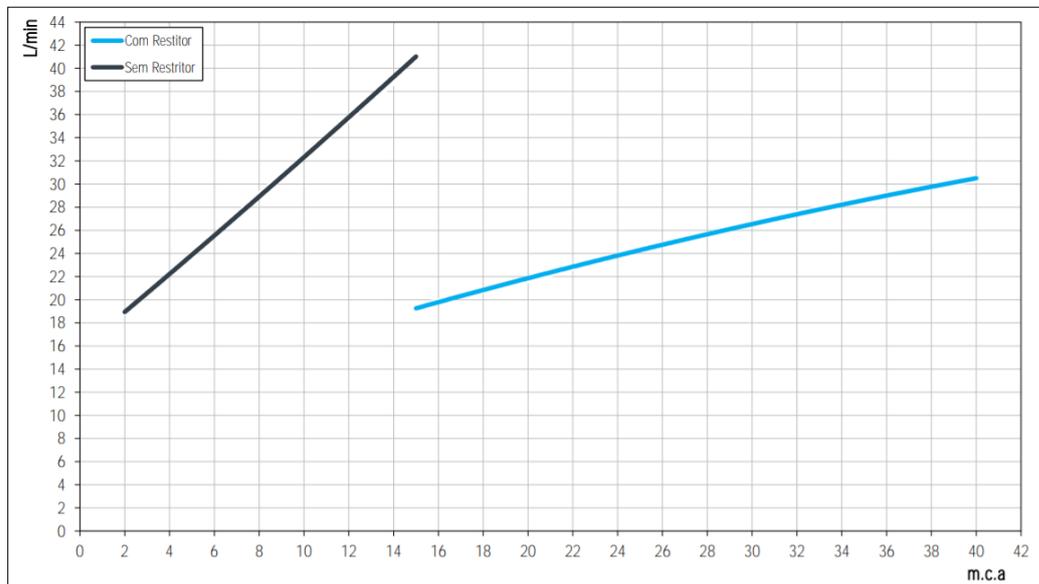


Figura 26 – Curva de vazão do chuveiro tradicional do fabricante Docol [Anexo C].

Assim, por exemplo, para a unidade no quarto andar, a torneira possui uma vazão de 9,5 L/min (0,57 m<sup>3</sup>/h), então o pulso trapezoidal foi gerado com flutuações em torno desta vazão e, para o chuveiro – considerando a utilização de

um restritor de pressão, conforme indica o fabricante – o pulso foi gerado por volta da vazão de 24 L/min (1,44 m<sup>3</sup>/h). Por sua vez, para a unidade no décimo primeiro andar o pulso da torneira foi gerado em torno da vazão de 3 L/min (0,18 m<sup>3</sup>/h) e do chuveiro – sem restritor – por volta de 20,5 L/min (1,23 m<sup>3</sup>/h).

Posteriormente, esses pulsos foram utilizados no software LTSpice<sup>®</sup> (V1 da Figura 22) para auferir o sinal de tensão do sensor, ou seja, obteve-se, em função do tempo, a resposta da simulação do *bend sensor* (tensão) perante o acionamento do sistema hidráulico (vazão). Estes valores de tensão foram fornecidos à rede neural artificial treinada, que foi apresentada na seção 3.4, para obter os valores de saída de vazão correspondentes.

Finalmente, objetivando-se estimar o volume a partir destas vazões encontradas, foram realizados dois cálculos por meios diferentes, o primeiro por cálculos analíticos e o segundo por cálculos numéricos.

A estimativa analítica foi feita a partir do pulso trapezoidal gerado que apresenta a vazão volumétrica ( $Q_v$ ), que é o volume (*vol*) de um fluido que escoar através de uma seção de uma tubulação em um intervalo de tempo ( $t$ ), e é definida por:

$$Q_v = \frac{\partial vol}{\partial t}, \quad (8)$$

Integrando-se a equação (8), obtém-se a equação:

$$\partial vol = Q_v \partial t \rightarrow \int_0^v (dvol) = \int_0^t Q_v dt, \quad (9)$$

A segunda estimativa foi realizada integrando numericamente os valores da vazão oriundos da rede neural pelo método trapezoidal do software Matlab, resultando no cálculo do volume. A Figura 27 apresenta de maneira resumida e esquemática os passos que foram realizados para a obtenção do volume pelos dois métodos.

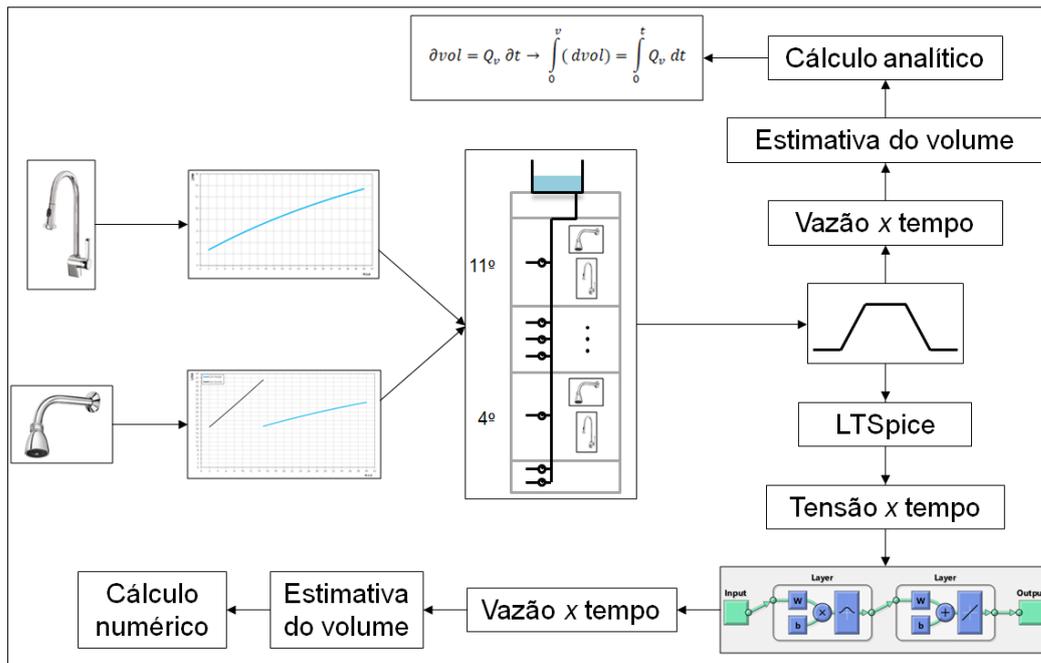


Figura 27 – Representação esquemática dos passos realizados para validar o conceito de medição do medidor proposto.

É importante ressaltar que o valor da pressão proveniente da curva de vazão do sistema hidráulico (seção 3.5) é diferente da oriunda da simulação computacional via *Fluent Ansys* (seção 3.2). A primeira pressão é denominada estática que corresponde à pressão da água quando ela está parada na tubulação e, segundo a norma ABNT NBR 5626, em uma instalação predial, uma pressão de 40 m.c.a não deve ser ultrapassada [66]. Por sua vez, a pressão da simulação computacional é chamada de dinâmica, ou seja, quando há movimento da água na tubulação – no momento em que algum sistema hidráulico é acionado. Além disso, a pressão dinâmica é a pressão estática menos as perdas de carga distribuída e localizada.

Em síntese, estes cálculos possibilitaram obter o volume de duas maneiras diferentes, ou seja, foi possível comparar por dois modelos o cálculo do volume. Com isso, foi possível realizar uma validação simulada do conceito de medição, como apresentado na seção 4.4.

## 4 Resultados e Discussões

Neste capítulo, apresentam-se o comportamento da resistência dos sensores resistivos de filme fino quando submetidos às variações angular (caracterização eletromecânica) e de temperatura (caracterização eletrotérmica), simulações nos softwares Ansys e LTSpice® objetivando-se encontrar uma correlação entre a resistência do sensor e a velocidade do escoamento e, por fim, uma formulação matemática para estimativa do volume, visando à aplicação do *bend sensor* para medição do volume de água escoado em uma tubulação de unidades autônomas.

Inicialmente, com vistas a facilitar a compreensão da organização do conteúdo das subseções, apresenta-se na Figura 28 um mapeamento do capítulo.

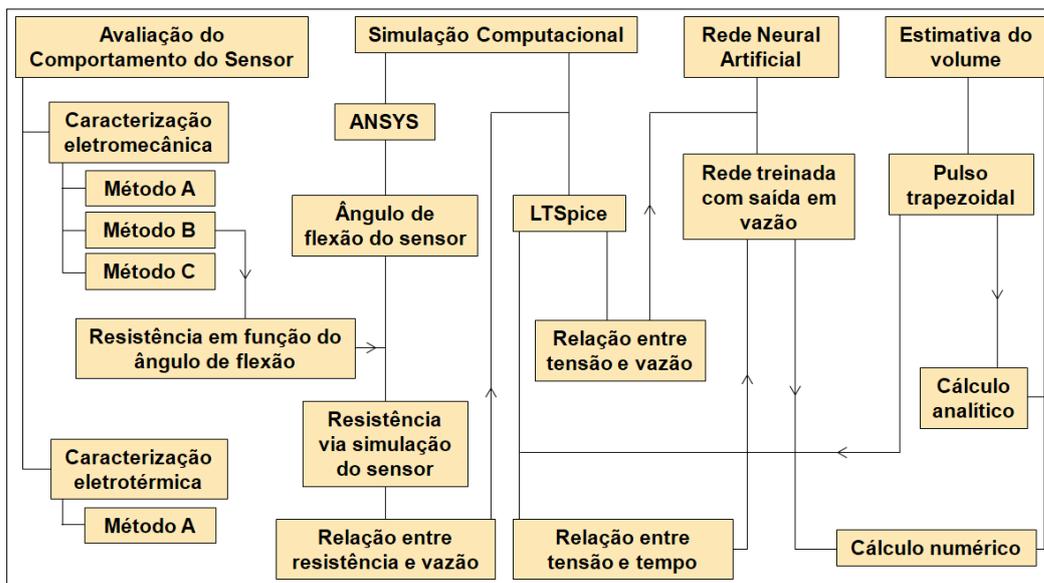


Figura 28 – Mapeamento do conteúdo do capítulo 4.

Diante deste mapeamento, os primeiros resultados a serem apresentados são os das caracterizações eletromecânica e eletrotérmica.

## 4.1. Avaliação do comportamento do *bend sensor*

### 4.1.1. Caracterização eletromecânica

O principal objetivo desta caracterização foi conhecer preliminarmente as características de variação da resistência do sensor em relação a sua deflexão angular e, com isso, analisar o seu desempenho. Foram avaliados os três métodos de caracterização descritos no Capítulo 2 (métodos A, B e C) e, para cada um, os seis sensores resistivos de filme fino foram caracterizados.

Adicionalmente, como cada método permitiu medir as resistências no incremento e no decremento do ângulo, foi possível obter a curva de histerese e calcular a máxima histerese para cada *bend sensor*. Além disso, a partir da resistência média – entre os valores no incremento e decremento do ângulo – obtiveram-se equações de regressão e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) via software Excel<sup>®</sup>.

#### 4.1.1.1. Método A

Conforme mencionado na seção 2.2, no ‘Método A’ utilizou-se um parafuso para flexionar o *bend sensor* unidirecionalmente. Apresentam-se a seguir os resultados para os seis sensores ensaiados.

- Bend sensor de uma polegada com revestimento de poliéster:

Os resultados referentes ao sensor de uma polegada de comprimento com revestimento de poliéster são mostrados na Figura 29. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 3,5 % do fundo de escala, uma variação de resistência média entre 1,40 k $\Omega$  e 5,28 k $\Omega$ , e a equação  $R(\theta) = 1,306 + 0,03986 e^{0,0768 \theta}$  como regressão exponencial, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9988.

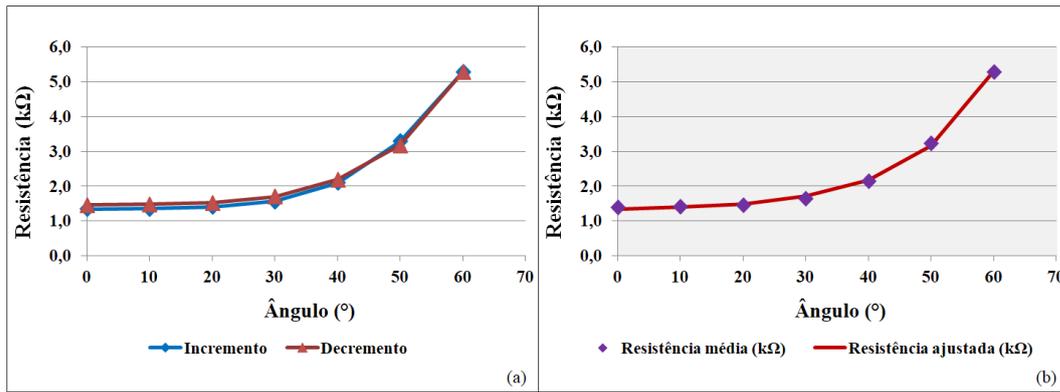


Figura 29 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de uma polegada de comprimento com revestimento de poliéster: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

- Bend sensor de uma polegada com revestimento de poliimida:

No que diz respeito ao sensor de uma polegada de comprimento com revestimento de poliimida, os resultados são mostrados na Figura 30. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 13 % do fundo de escala e uma variação de resistência média entre 3,51 kΩ e 10,65 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 3,492 + 0,08506 e^{0,0851 \theta}$  como regressão exponencial, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9964.

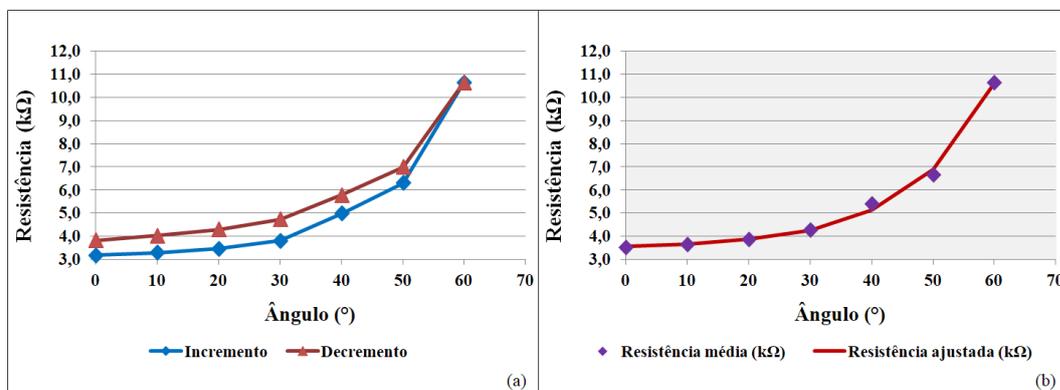


Figura 30 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de uma polegada de comprimento com revestimento de poliimida: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

- Bend sensor de uma polegada sem revestimento:

Em relação ao sensor de uma polegada de comprimento sem revestimento, os resultados são mostrados na Figura 31. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 2,5 % do fundo de escala e uma variação de resistência média

entre 1,77 kΩ e 28,07 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 1,220 + 0,4033 e^{0,0700 \theta}$  como regressão exponencial, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9999.

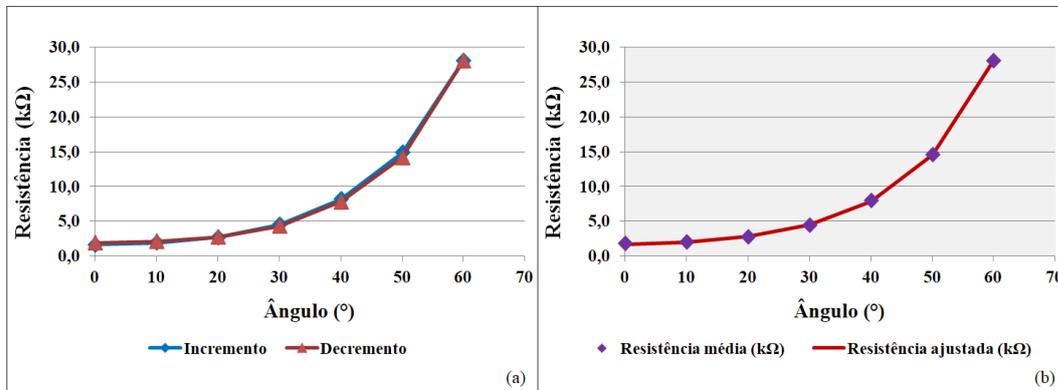


Figura 31 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de uma polegada de comprimento sem revestimento: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

- Bend sensor de duas polegadas com revestimento de poliéster:

Por sua vez, os resultados do sensor de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliéster são mostrados na Figura 32. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 15 % do fundo de escala e uma variação de resistência média entre 3,85 kΩ e 5,25 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 3,633 + 0,1778 e^{0,0319 \theta}$  como regressão exponencial, com  $R^2$  igual a 0,9949.

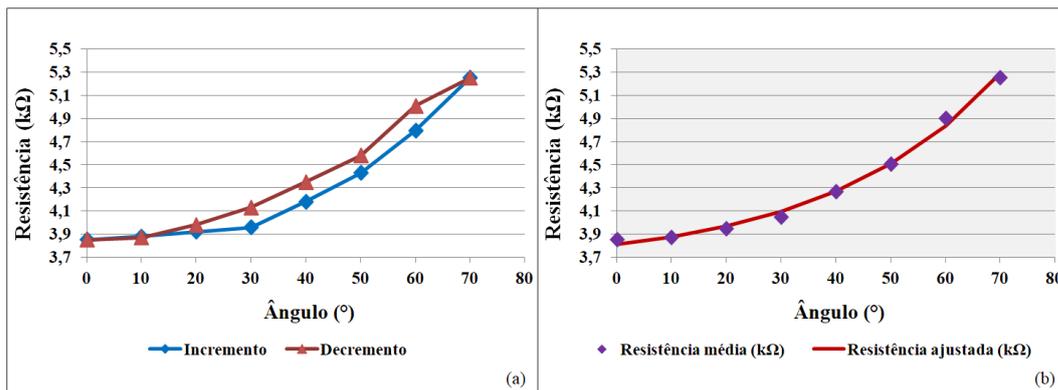


Figura 32 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliéster: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

- Bend sensor de duas polegadas com revestimento de poliimida:

No que se refere ao sensor com revestimento de poliimida, os resultados encontram-se na Figura 33. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 29 % do fundo de escala e uma variação de resistência média entre 10,23 kΩ e 10,43 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 10,19 + 0,04694 e^{0,0229 \theta}$  como regressão exponencial, com R<sup>2</sup> igual a 0,9489.

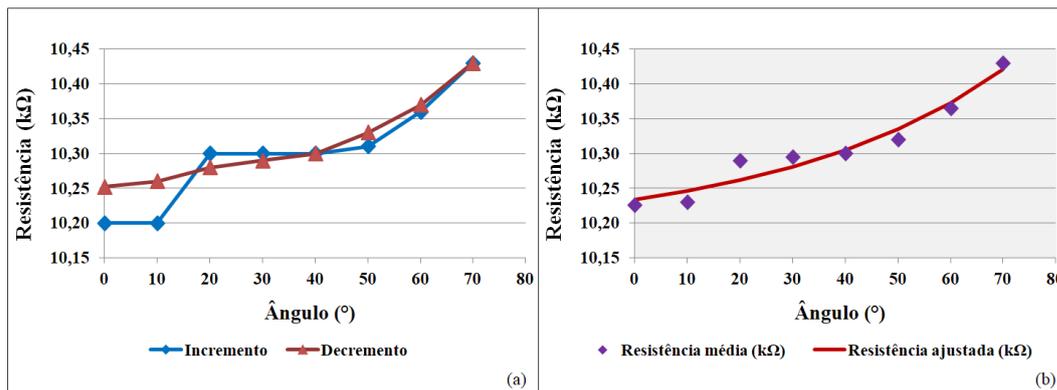


Figura 33 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliimida: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

- Bend sensor de duas polegadas sem revestimento:

No que tange ao sensor de duas polegadas de comprimento sem revestimento, os resultados são mostrados na Figura 34.

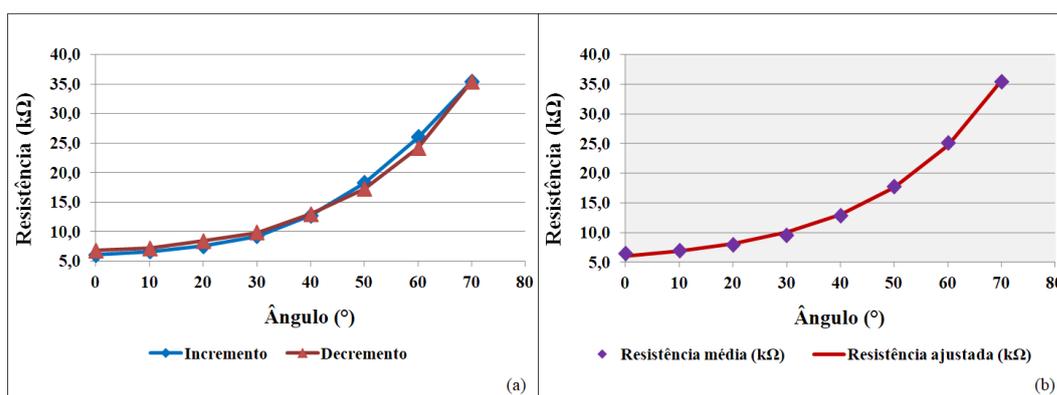


Figura 34 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de duas polegadas de comprimento sem revestimento: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 6,1 % do fundo de escala e uma variação de resistência média entre 6,45 kΩ e 35,40 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 4,591 + 1,469 e^{0,0436 \theta}$  como regressão exponencial, com  $R^2$  igual a 0,9992.

#### 4.1.1.2. Método B

Conforme mencionado na seção 2.2, o ‘Método B’ utilizou um componente móvel para flexionar o *bend sensor* bidirecionalmente. Apresentam-se a seguir os resultados para os seis sensores ensaiados.

- Bend sensor de uma polegada com revestimento de poliéster:

Os resultados referentes ao sensor de uma polegada de comprimento com revestimento de poliéster são mostrados na Figura 35. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 5,7 % do fundo de escala, uma variação de resistência média entre 1,66 kΩ e 5,00 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 1,220 + 0,2701 e^{0,0449 \theta}$  como regressão exponencial, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9444.

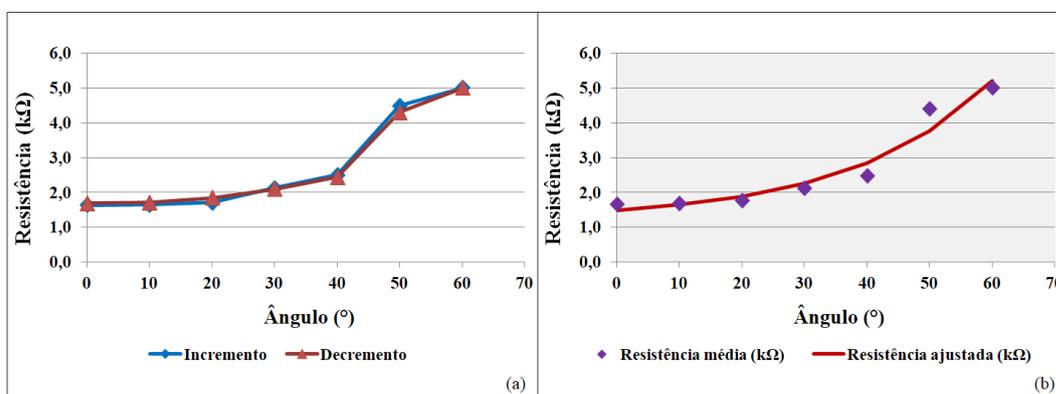


Figura 35 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de uma polegada de comprimento com revestimento de poliéster: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

- Bend sensor de uma polegada com revestimento de poliimida:

No que diz respeito ao sensor de uma polegada de comprimento com revestimento de poliimida, os resultados são mostrados na Figura 36. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 1,4 % do fundo de escala, uma variação

de resistência média entre 3,17 kΩ e 6,04 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 3,283 + 0,002588 e^{0,116 \theta}$  como regressão exponencial, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9933.

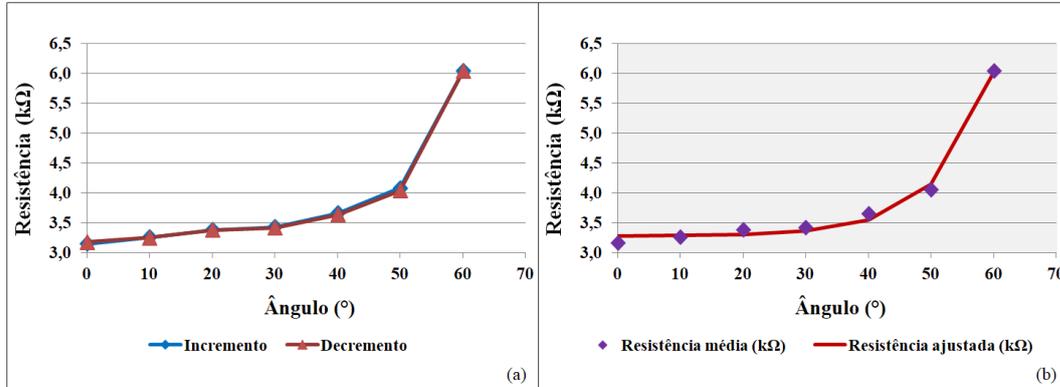


Figura 36 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de uma polegada de comprimento com revestimento de poliimida: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

- Bend sensor de uma polegada sem revestimento:

Em relação ao sensor de uma polegada de comprimento sem revestimento, os resultados são mostrados na Figura 37. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 1,7 % do fundo de escala, uma variação de resistência média entre 1,70 kΩ e 13,50 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 1,829 + 0,01480 e^{0,111 \theta}$  como regressão exponencial, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9990.

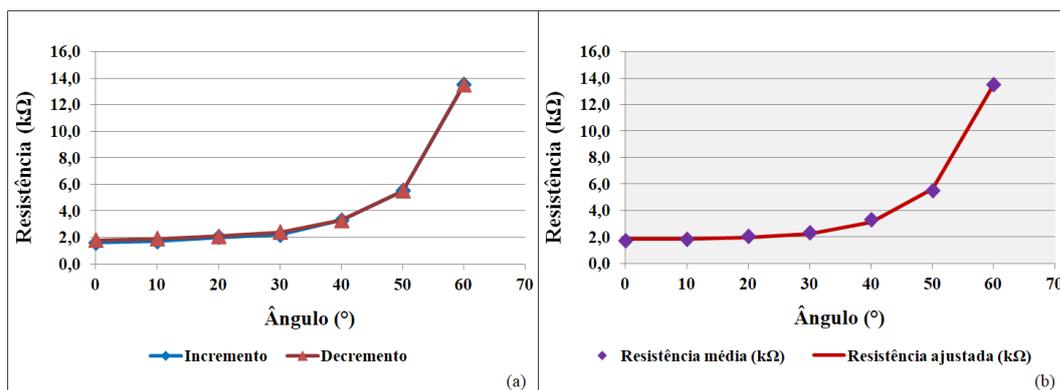


Figura 37 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de uma polegada de comprimento sem revestimento: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

- Bend sensor de duas polegadas com revestimento de poliéster:

Por sua vez, os resultados do sensor de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliéster são mostrados na Figura 38. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 6 % do fundo de escala, uma variação de resistência média entre 4,31 kΩ e 8,73 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 4,193 + 0,1877 e^{0,0455 \theta}$  como regressão exponencial, com R<sup>2</sup> de 0,9985.

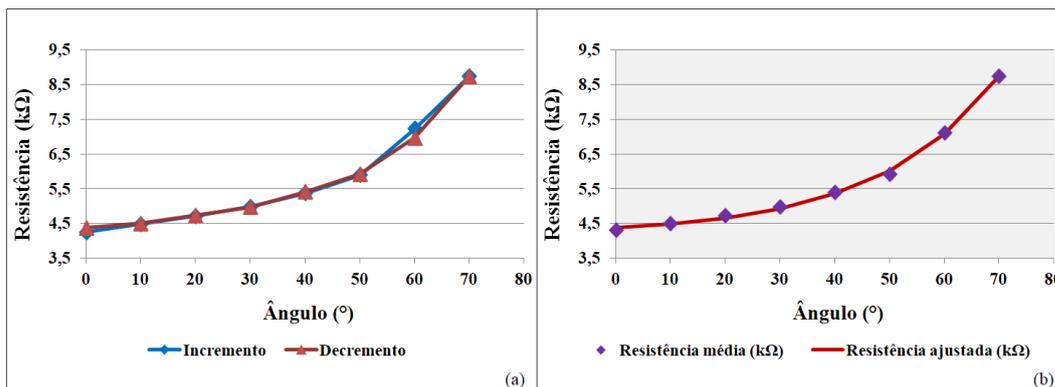


Figura 38 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliéster: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

- Bend sensor de duas polegadas com revestimento de poliimida:

No que se refere ao sensor com revestimento de poliimida, os resultados encontram-se na Figura 39.

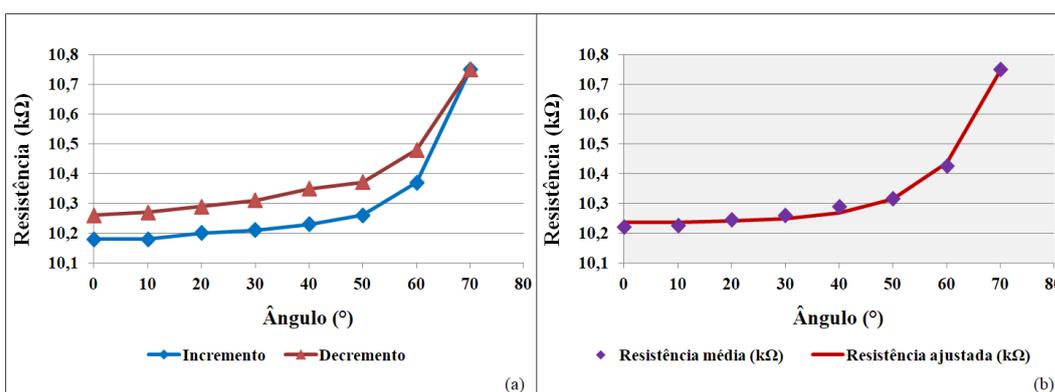


Figura 39 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliimida: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 23 % do fundo de escala, uma variação de resistência média entre 10,22 kΩ e 10,75 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 10,24 + 0,000773 e^{0,0928 \theta}$  como regressão exponencial, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9949.

- Bend sensor de duas polegadas sem revestimento:

No que tange ao sensor de duas polegadas de comprimento sem revestimento, os resultados são mostrados na Figura 40. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 5,2 % do fundo de escala, uma variação de resistência média entre 5,80 kΩ e 23,00 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 5,086 + 0,6412 e^{0,0476 \theta}$  como regressão exponencial, com  $R^2$  de 0,9994.

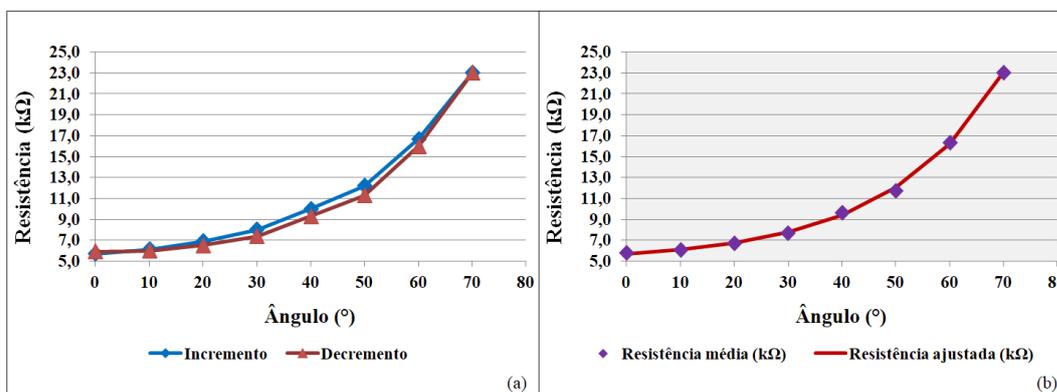


Figura 40 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de duas polegadas de comprimento sem revestimento: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

#### 4.1.1.3. Método C

Conforme mencionado na seção 2.2, no ‘Método C’ o *bend sensor* foi curvado manualmente até o ângulo de rotação desejado. Apresentam-se a seguir os resultados para os seis sensores ensaiados.

- Bend sensor de uma polegada com revestimento de poliéster:

Os resultados referentes ao sensor de uma polegada de comprimento com revestimento de poliéster são mostrados na Figura 41. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 9,2 % do fundo de escala, uma variação de resistência

média entre 1,34 kΩ e 11,69 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 0,205 + 0,8592 e^{0,0291 \theta}$  como regressão exponencial, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9955.

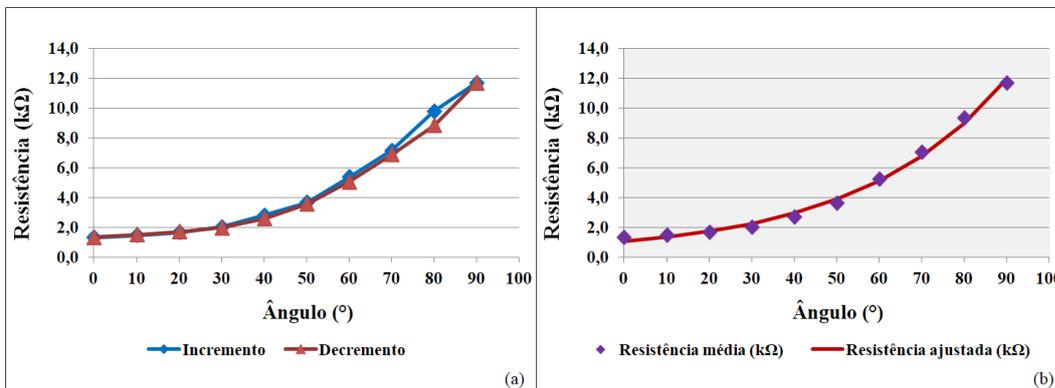


Figura 41 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de uma polegada de comprimento com revestimento de poliéster: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

- Bend sensor de uma polegada com revestimento de poliimida:

No que diz respeito ao sensor de uma polegada de comprimento com revestimento de poliimida, os resultados são mostrados na Figura 42. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 12 % do fundo de escala, uma variação de resistência média entre 2,25 kΩ e 6,22 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 2,098 + 0,2802 e^{0,0296 \theta}$  como regressão exponencial, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9946.

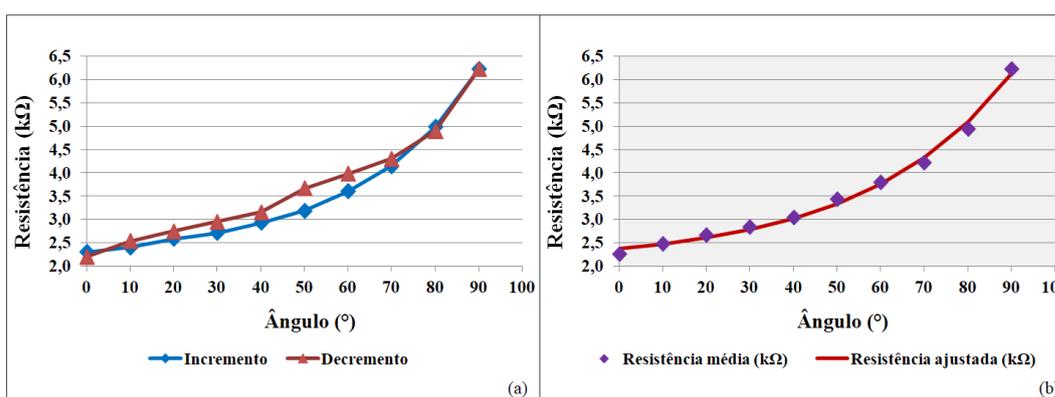


Figura 42 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de uma polegada de comprimento com revestimento de poliimida: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

- Bend sensor de uma polegada sem revestimento:

Em relação ao sensor de uma polegada de comprimento sem revestimento, os resultados são mostrados na Figura 43. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 8,3 % do fundo de escala, uma variação de resistência média entre 1,31 kΩ e 3,82 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 1,145 + 0,2404 e^{0,0263 \theta}$  como regressão exponencial, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9859.

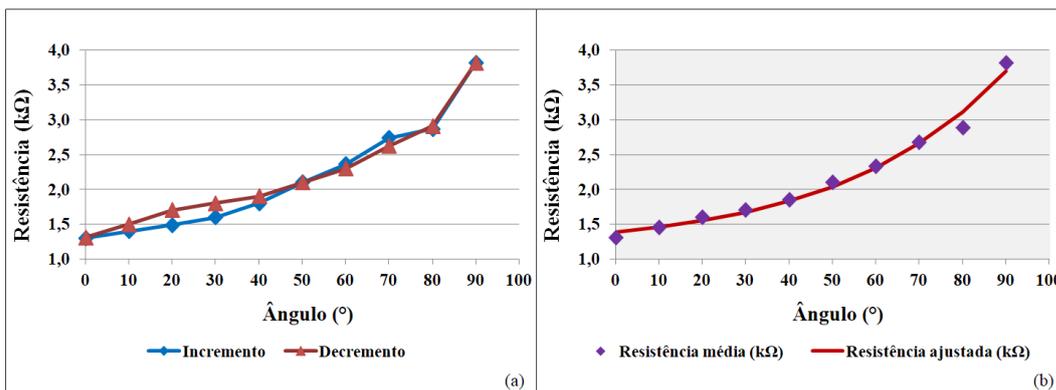


Figura 43 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de uma polegada de comprimento sem revestimento: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

- Bend sensor de duas polegadas com revestimento de poliéster:

Por sua vez, os resultados do sensor de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliéster são mostrados na Figura 44.

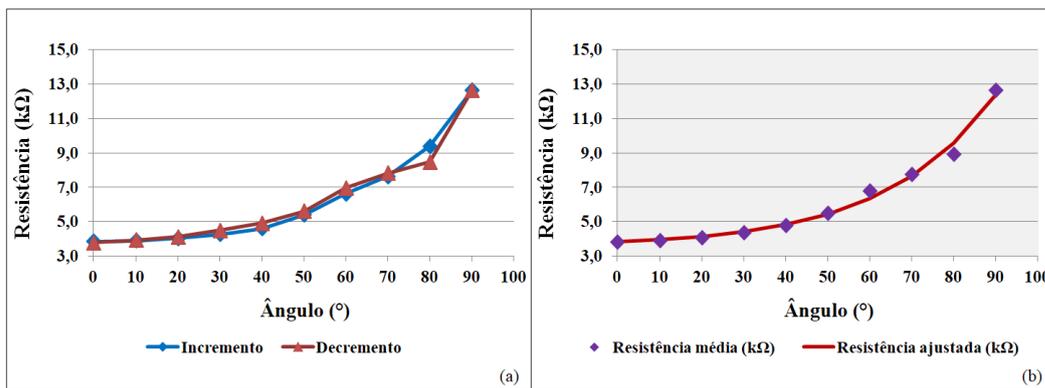


Figura 44 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliéster: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 10 % do fundo de escala, uma variação de resistência média entre 3,82 kΩ e 12,64 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 3,534 + 0,2809 e^{0,0383 \theta}$  como regressão exponencial, com  $R^2$  de 0,9903.

- Bend sensor de duas polegadas com revestimento de poliimida:

No que se refere ao sensor com revestimento de poliimida, os resultados encontram-se na Figura 45. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 15 % do fundo de escala, uma variação de resistência média entre 10,57 kΩ e 16,08 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 10,54 + 0,0774 e^{0,0474 \theta}$  como regressão exponencial, com  $R^2$  de 0,9997.

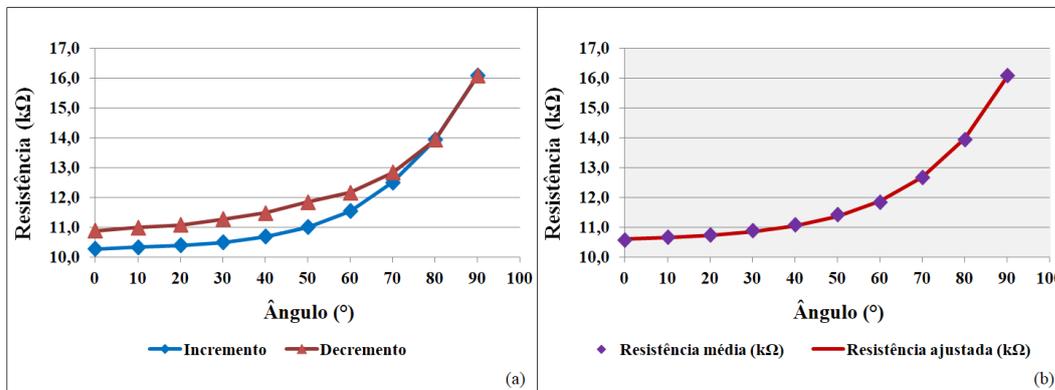


Figura 45 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de duas polegadas de comprimento com revestimento de poliimida: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Equação de regressão e coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

- Bend sensor de duas polegadas sem revestimento:

No que tange ao sensor de duas polegadas de comprimento sem revestimento, os resultados são mostrados na Figura 46. Este sensor apresentou uma histerese máxima igual a 15 % do fundo de escala, uma variação de resistência média entre 5,09 kΩ e 35,98 kΩ, e a equação  $R(\theta) = 4,094 + 0,7329 e^{0,0419 \theta}$  como regressão exponencial, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9985.

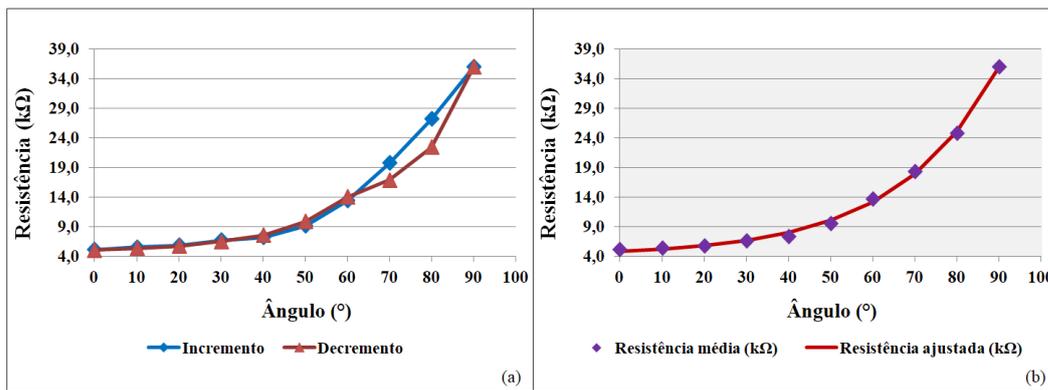


Figura 46 – Resistência em função do ângulo de rotação do *bend sensor* de duas polegadas de comprimento sem revestimento: (a) Resistências no incremento e no decremento do ângulo; (b) Resistência média e ajustada.

Resumidamente, os valores da histerese máxima e do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de cada sensor para cada método são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Histerese máxima e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da curva de cada sensor pelos Métodos A, B e C.

Comprimento		Revestimento	Método A		Método B		Método C	
polegadas	milímetros		Histerese (%)	$R^2$	Histerese (%)	$R^2$	Histerese (%)	$R^2$
1	25,4	poliéster	3,5	0,9988	5,7	0,9444	9,2	0,9955
		poliimida	13,0	0,9964	1,4	0,9933	12,0	0,9946
		nenhum	2,5	0,9999	1,7	0,9990	8,3	0,9859
2	50,8	poliéster	15,0	0,9949	6,0	0,9985	10,0	0,9903
		poliimida	29,0	0,9489	23,0	0,9949	15,0	0,9997
		nenhum	6,1	0,9992	5,2	0,9994	15,0	0,9985

Vale ressaltar que, ao se considerar a mudança na velocidade do fluxo de água dentro de uma tubulação, torna-se imperativo que o hidrômetro proposto baseado em um sensor resistivo de filme fino tenha o menor valor de histerese possível, ou seja, a maior concordância entre as curvas de “carregamento” e “descarregamento”. Sendo assim, comparando os resultados oriundos das três metodologias desenvolvidas e testadas, o ‘Método B’ que utiliza um componente móvel para flexionar o sensor resistivo, em média, apresentou uma menor histerese, indicando ser o método mais adequado para caracterizar os sensores. Então, levando-se em consideração apenas o ‘Método B’ foi possível observar que o sensor revestido com poliimida e com comprimento de uma polegada

demonstrou uma promissora aplicabilidade para medição de consumo hídrico em virtude de ter apresentado um menor valor de histerese.

Neste sentido, cabe ainda salientar que, como a proposta é utilizar o sensor resistivo em uma tubulação para medição do volume de água, o mesmo deve apresentar características que suportem esse tipo de aplicação. Por isso, os sensores sem revestimento foram descartados para a continuidade deste trabalho, e apenas os com revestimentos de poliéster e de poliimida foram considerados nas avaliações posteriores.

Por fim, destaca-se também que, mesmo o ‘Método B’ apresentando um resultado melhor em comparação com as demais metodologias, o ‘Método A’ foi escolhido e utilizado na caracterização eletrotérmica. Esta escolha se deu em razão do *setup* ser mais robusto, composto por uma estrutura metálica, conforme apresentado na seção 2.2 e na Figura 11(a), que o tornava mais adequado para ser colocado dentro da câmara climática.

#### **4.1.2. Caracterização eletrotérmica**

Fundamentalmente, o objetivo desta caracterização foi conhecer e analisar as características de variação da resistência do sensor quando submetido a mudanças de temperatura. Foram avaliados quatro sensores resistivos de filme fino: um sensor de uma polegada e outro de duas polegadas com revestimento de poliéster, e um sensor de uma polegada e outro de duas polegadas com revestimento de poliimida.

A metodologia utilizada permitiu medir as resistências do sensor no incremento e no decremento da temperatura com o ângulo de curvatura fixo, sendo assim possível calcular e avaliar a histerese em relação à temperatura. O primeiro *bend sensor* caracterizado foi o revestido com poliéster com o comprimento de duas polegadas, que apresentou, quando submetido ao aquecimento e ao resfriamento da câmara climática, o mesmo comportamento para todos os ângulos testados – conforme a temperatura aumentou, a resistência do sensor diminuiu, e quando a temperatura diminuiu, a resistência aumentou

(Figura 47) – demonstrando, assim, uma boa concordância entre as curvas de “carregamento” e “descarregamento” do sensor.

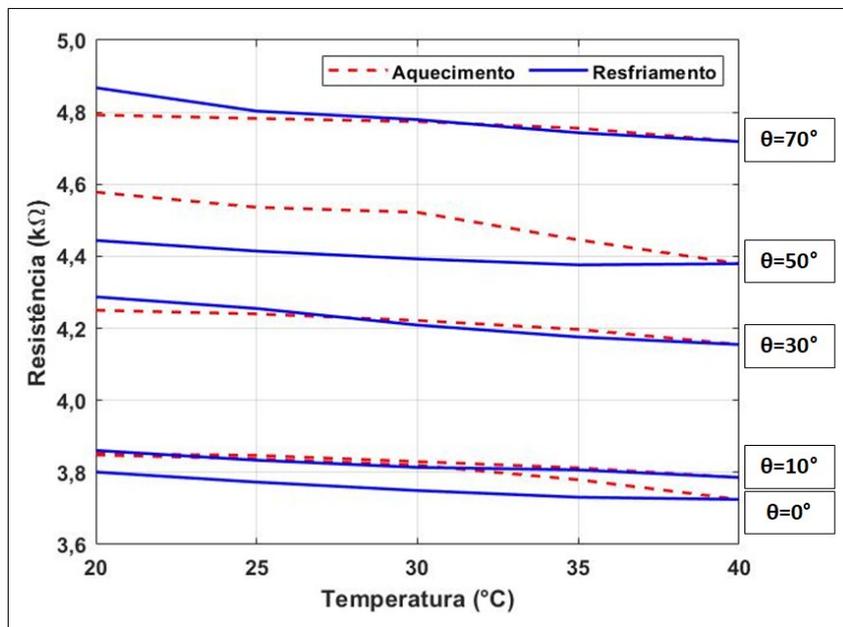


Figura 47 – Resposta da resistência do *bend sensor* revestido de poliéster com duas polegadas de comprimento em relação à variação da temperatura para diferentes ângulos de rotação.

Na sequência, o sensor caracterizado foi o com revestimento de poliimida, também com duas polegadas de comprimento. Quando submetido ao ciclo da câmara climática, este sensor apresentou um comportamento diferente entre os ângulos testados (Figura 48). Ao realizar o aquecimento nos ângulos de 0° (sensor em repouso) e 10°, os valores da resistência diminuíram, e no resfriamento esses valores aumentaram (Figura 48a), conforme ocorreu no sensor revestido de poliéster e era esperado. Contudo, para os ângulos de 30°, 50° e 70°, este comportamento não se manteve. No ângulo de 30°, a resistência diminuiu com o aumento da temperatura até 35 °C, de 35 °C até 40 °C a resistência aumentou, e depois, no resfriamento a resistência seguiu aumentando (Figura 48a). Nos ângulos de 50° e 70°, conforme a temperatura aumentava, a resistência do sensor também se elevava, e durante o resfriamento, com a diminuição da temperatura, a resistência do sensor aumentou consideravelmente (Figura 48b) – denotando, assim, um comportamento irregular entre as curvas de “carregamento” e “descarregamento” do sensor.

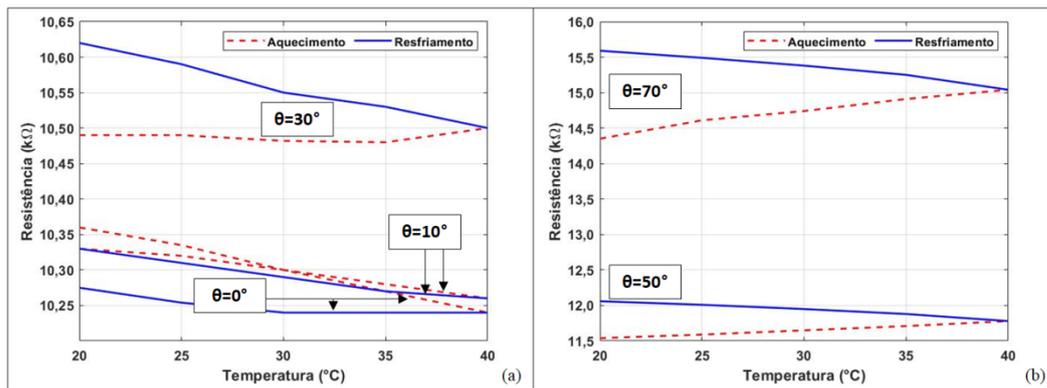


Figura 48 – Resistência do primeiro *bend sensor* revestido de poliimida com duas polegadas de comprimento em relação à variação da temperatura para os ângulos de rotação: (a)  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $30^\circ$ ; (b)  $50^\circ$  e  $70^\circ$ .

De modo geral, o comportamento do *bend sensor* com revestimento de poliimida com duas polegadas de comprimento verificado nesta caracterização eletrotérmica pode ser adjetivado como excêntrico, pois este polímero faz parte do grupo dos plásticos da super engenharia, ou seja, são polímeros de ultradesempenho. A poliimida possui características significantes e particulares, tais como: estabilidade química e termo oxidativa a altas temperaturas, resistência a solventes e irradiação, baixa inflamabilidade e emissão de fumaça, propriedades semicondutoras superiores e alta estabilidade térmica. Esta última é uma das qualidades mais marcantes da poliimida, possibilitando este material ser utilizado por longos períodos em temperaturas de até  $200^\circ\text{C}$  e, por outro lado, por curto prazo em temperaturas de até  $480^\circ\text{C}$  sem afetar seu comportamento mecânico [67, 68].

Conforme mencionado, este tipo de plástico dispõe de excelentes propriedades elétricas, químicas e físico-mecânicas, suscitando dúvidas em relação aos resultados obtidos nesta caracterização. Por este motivo, outro *bend sensor* – também revestido de poliimida e com duas polegadas de comprimento – foi submetido à mesma caracterização eletrotérmica a fim de confirmar o comportamento anômalo observado.

Do mesmo modo, assim como ocorrera com o primeiro *bend sensor* com revestimento de poliimida, o sensor reserva apresentou resultados irregulares (Figura 49). Para os ângulos de  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $30^\circ$ , apresentou um comportamento com boa histerese (Figura 49a); todavia, para os ângulos de  $50^\circ$  e  $70^\circ$ , demonstrou uma

não-concordância entre as curvas de “carregamento” e “descarregamento” da temperatura (Figura 49b).

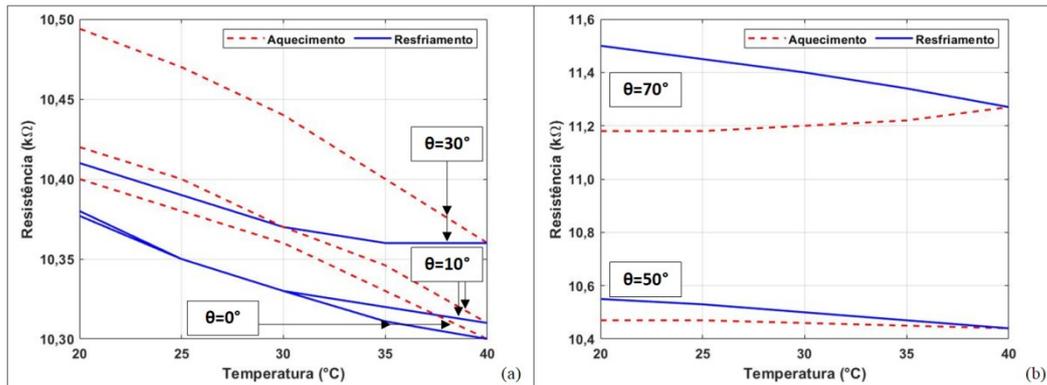


Figura 49 – Resposta da resistência do segundo bend sensor revestido de poliimida em relação a variação da temperatura para os ângulos de rotação: (a) 0°, 10° e 30°; (b) 50° e 70°.

Além dos sensores com duas polegadas de comprimento, os sensores com uma polegada também foram caracterizados eletrotermicamente. O *bend sensor* revestido de poliimida (uma polegada), quando submetido ao ciclo da câmara climática, apresentou um comportamento irregular, similar ao do sensor de duas polegadas com o mesmo revestimento. No ângulo de 0°, ao se realizar o aquecimento, os valores da resistência diminuíram, e no resfriamento esses valores se reduziram também (Figura 50a). Por sua vez, para os ângulos de 10°, 30°, 50° e 60°, este comportamento não permaneceu. Nestes ângulos, enquanto a temperatura se elevava, a resistência do sensor também aumentava, e durante o resfriamento, com a diminuição da temperatura, a resistência do sensor continuou aumentando (Figura 50b). Portanto, assim como ocorreu com o sensor de duas polegadas revestido de poliimida, o sensor de uma polegada apresentou um comportamento irregular entre as curvas de “carregamento” e “descarregamento” do sensor.

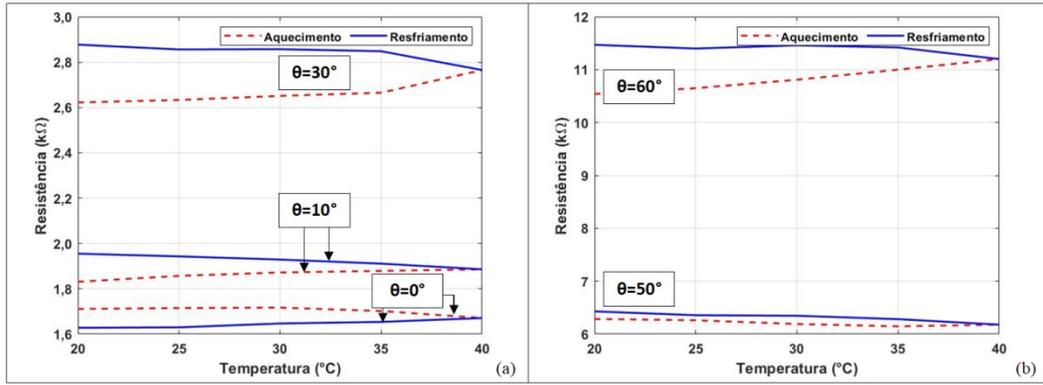


Figura 50 – Resposta da resistência do *bend sensor* – revestido de poliimida com uma polegada de comprimento – em relação a variação da temperatura para os ângulos de rotação: (a) 0°, 10° e 30°; (b) 50° e 60°.

O outro *bend sensor* caracterizado foi o revestido com poliéster com o comprimento de uma polegada. Este, quando submetido ao aquecimento e ao resfriamento da câmara climática, apresentou um mesmo comportamento para todos os ângulos testados – à medida que a temperatura se elevou, a resistência do sensor diminuiu e, quando a temperatura diminuiu, a resistência aumentou (Figura 51) – verificando, assim como o sensor de duas polegadas revestido de poliéster, uma boa concordância entre as curvas de “carregamento” e “descarregamento” do sensor.

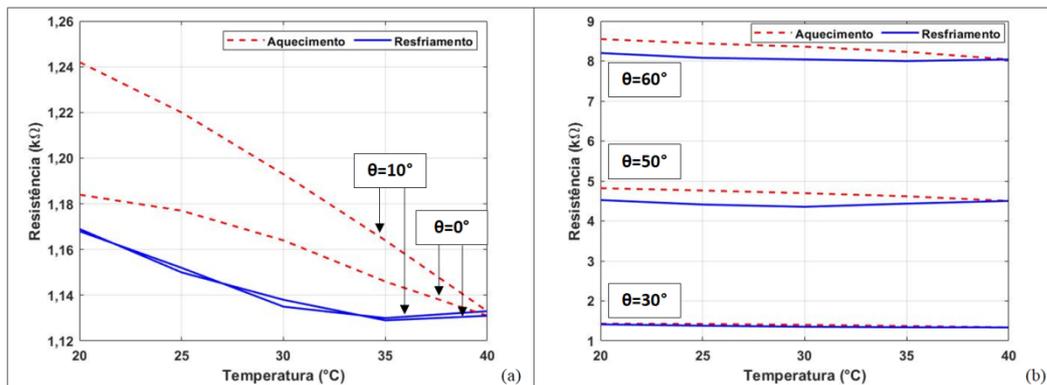


Figura 51 – Resposta da resistência do *bend sensor* – revestido de poliéster com uma polegada de comprimento – em relação a variação da temperatura para os ângulos de rotação: (a) 0° e 10°; (b) 30°, 50° e 60°.

Conseqüentemente, diante destes resultados, o comportamento dos sensores resistivos de filme fino revestidos de poliimida – tanto de uma polegada quanto o de duas polegadas – inviabiliza a utilização dos mesmos para medição de

consumo de água em tubulações de unidades autônomas, visto que, conforme especificações do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), os hidrômetros devem ser construídos com materiais resistentes a variações de temperatura entre +1 °C e + 40 °C [13].

Diante disso, visto que os *bend sensors* com revestimento de poliéster demonstraram um comportamento mais regular e satisfatório, com uma melhor conformidade entre as curvas de “carregamento” e “descarregamento”, apresentam-se na Figura 52, na Figura 53 e na Figura 54 os resultados obtidos destes dois sensores, indicando as grandezas medidas de formas diferentes.

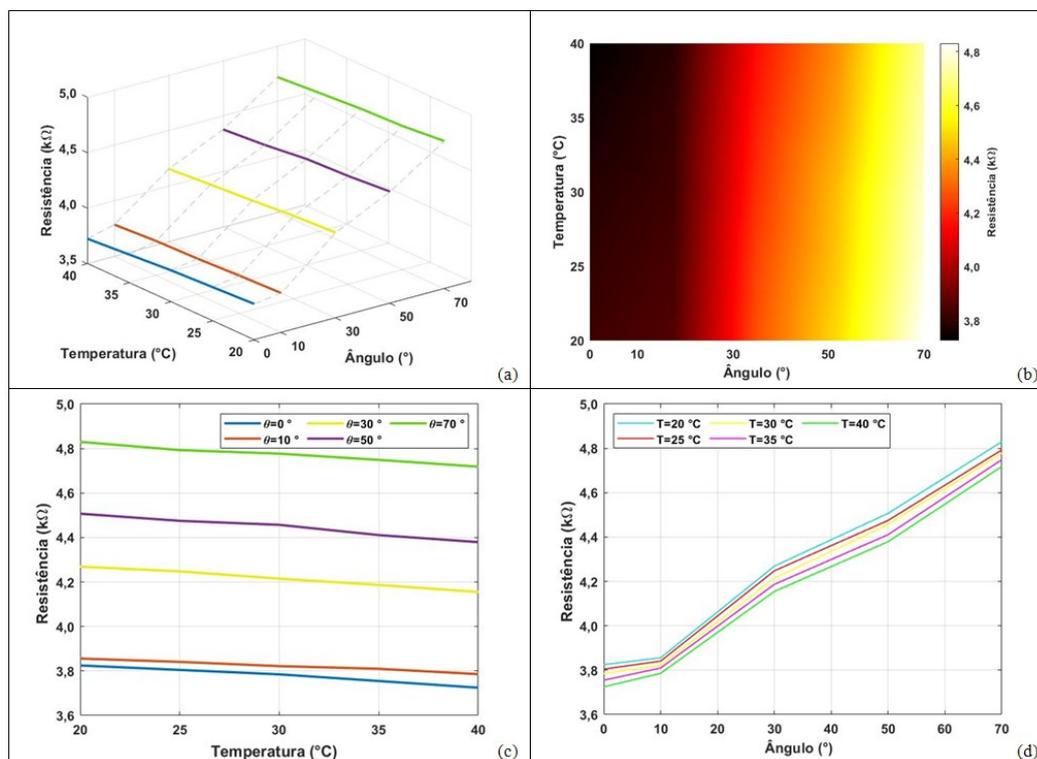


Figura 52 – Resposta do *bend sensor* revestido de poliéster com duas polegadas de comprimento: (a) Gráfico tridimensional da resistência média entre os valores de incremento e decremento da temperatura para cada ângulo; (b) Mapa de cores das grandezas medida; (c) Resistência do sensor em função da temperatura; (d) Resistência sensor em função do ângulo de deflexão.

Na Figura 52 são mostrados os resultados do sensor com duas polegadas de comprimento: na Figura 52(a) a média das resistências entre os valores no incremento e decremento da temperatura para cada ângulo, na Figura 52(b) as mesmas grandezas relacionadas por meio de um mapa de cores, na Figura 52(c) a

resposta da resistência do *bend sensor* em relação à temperatura e na Figura 52(d) em relação ao ângulo.

No que concerne ao sensor resistivo com uma polegada de comprimento e revestimento de poliéster, os resultados são apresentados na Figura 53 e na Figura 54. Assim, como no caso do sensor de duas polegadas, neste caso também, apresenta-se para cada ângulo, por meio de um gráfico 3D, a média das resistências entre os valores no incremento e decremento da temperatura (Figura 53a) e as mesmas grandezas relacionadas por meio de um mapa de cores (Figura 53b).

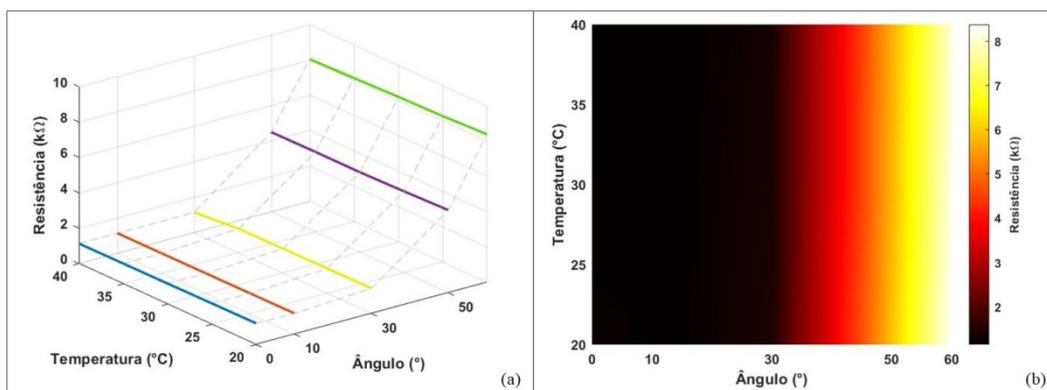


Figura 53 – Resposta do *bend sensor* revestido de poliéster – com uma polegada de comprimento – em relação à resistência média entre os valores de incremento e decremento da temperatura para cada ângulo, por meio de: (a) Gráfico tridimensional das grandezas medidas; (b) Mapa de cores.

Adicionalmente, as respostas da resistência deste *bend sensor* em relação à temperatura e ao ângulo podem ser vistas, respectivamente, na Figura 54(a) e na Figura 54(b).

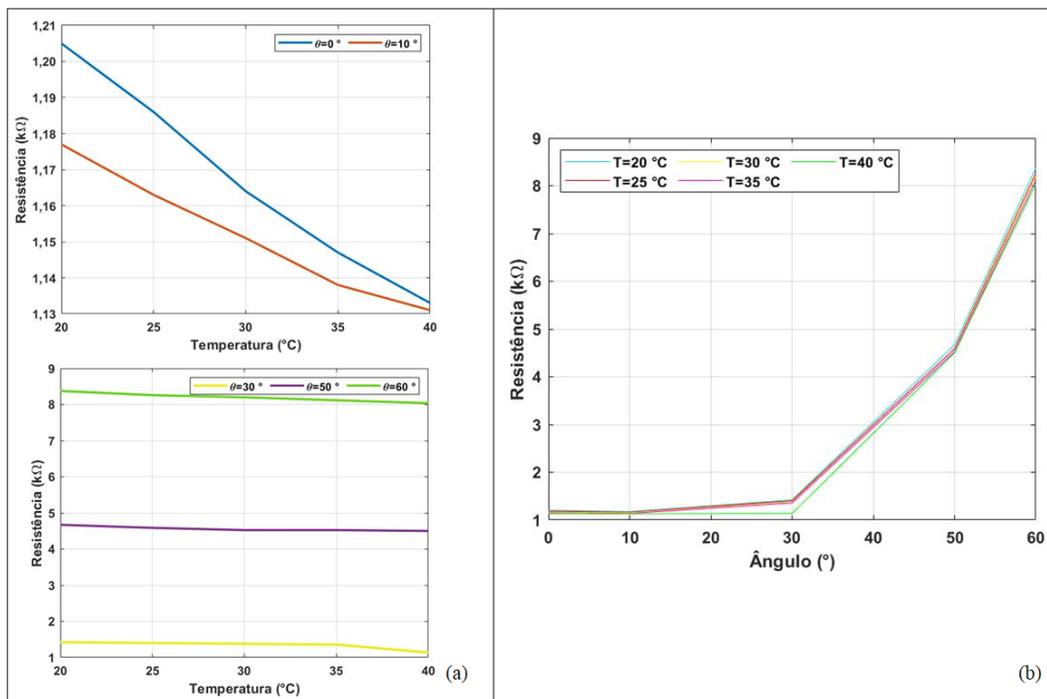


Figura 54 – Resistência do bend sensor revestido com poliéster em função: (a) da temperatura; (b) do ângulo de rotação.

De modo geral, ao analisar os resultados apresentados, os *bend sensors* revestidos com poliéster apresentaram como comportamento uma relação linear negativa entre a resistência do sensor e a variação de temperatura, ou seja, a resistência diminui quando a temperatura aumenta.

Diante disso, destaca-se que, apesar dos sensores resistivos de filme fino apresentarem, na caracterização eletromecânica, um bom comportamento exponencial entre a resistência do sensor e a variação do ângulo de rotação, esta caracterização não considera o efeito da temperatura. Logo, para fins do hidrômetro proposto, o teste de caracterização eletrotérmico é mais significativo, pois se assemelha mais com a realidade das tubulações prediais. Portanto, em virtude dos *bend sensors* com revestimento de poliéster terem demonstrado um comportamento mais estável em comparação aos de poliimida, bem como um valor de histerese menor na caracterização eletrotérmica, mostram-se mais viáveis, em termos de aplicabilidade, para medição de consumo de água em tubulações de unidades autônomas de edifícios. Por estes motivos, apenas os sensores com revestimento de poliéster foram utilizados nas simulações dos softwares Ansys e LTspice<sup>®</sup>.

Neste contexto, acentua-se que com base nos resultados das caracterizações eletromecânica e eletrotérmica, um artigo intitulado “*Proposition of water meter for buildings based on a thin-film resistive sensor: electromechanical and thermal characterizations*” foi apresentado ao Congresso Brasileiro de Metrologia 2021 (Anexo D).

#### 4.2. Simulação em Ansys

Com o propósito de analisar computacionalmente o *bend sensor* e avaliar sua aplicabilidade para medição do consumo de água em unidades autônomas, fez-se necessário um estudo do comportamento do sensor por meio de uma simulação computacional no software Ansys, como descrito na seção 3.2. O principal objetivo foi obter computacionalmente o ângulo de deflexão do sensor provocado pelo escoamento da água na tubulação para, então, calcular as resistências correspondentes utilizando a equação de regressão encontrada na seção 4.1.1.

Assim, apresentam-se nesta seção os resultados da interação do escoamento da água na tubulação com o comportamento de deflexão dos sensores resistivos com revestimento de poliéster – com uma e duas polegadas de comprimento.

Os resultados referentes ao *bend sensor* com uma polegada de comprimento são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da simulação Ansys com o *bend sensor* de uma polegada.

$v$ (m/s)	Re (adimensional)	Pressão (Pa)	Deformação (mm)	Ângulo de deflexão		$R_s$ (k $\Omega$ )
				(rad)	( $^\circ$ )	
0,58	21992	287	22,92	1,20	69	7,18
0,53	19954	240	19,17	1,01	58	4,81
0,47	17916	189	15,09	0,79	45	3,29
0,42	15878	151	12,06	0,63	36	2,60
0,37	13840	117	9,34	0,49	28	2,17
0,31	11802	81,8	6,53	0,34	20	1,87
0,26	9764	57,7	4,61	0,24	14	1,72
0,20	7726	34,1	2,72	0,14	8	1,61
0,15	5688	19,2	1,53	0,081	5	1,55

A velocidade utilizada na simulação do escoamento, a fim de obter-se a pressão para flexionar o sensor de 1 polegada de comprimento, variou de 0,15 m/s até 0,58 m/s. Com isso, este sensor apresentou uma variação da deflexão entre 5° e 69° e da resistência ( $R_s$ ) entre 1,56 k $\Omega$  e 7,18 k $\Omega$ .

Por fim, o *bend sensor* com duas polegadas tem seus resultados apresentados na Tabela 5. Para este sensor, a velocidade utilizada na simulação variou de 0,060 m/s até 0,26 m/s. Com isso, ele apresentou uma variação da deflexão entre 4° e 70° e da resistência ( $R_s$ ) entre 4,42 k $\Omega$  e 8,81 k $\Omega$ .

Tabela 5 – Resultados da simulação Ansys com o *bend sensor* de duas polegadas.

$v$ (m/s)	Re (adimensional)	Pressão (Pa)	Deformação (mm)	Ângulo de deflexão		$R_s$ (k $\Omega$ )
				(rad)	(°)	
0,26	16115	35,05	46,82	1,23	70	8,81
0,23	14575	28,30	37,79	0,99	57	6,68
0,21	13034	22,70	30,32	0,80	46	5,69
0,18	11494	17,60	23,50	0,62	35	5,13
0,16	9953	13,27	17,72	0,47	27	4,82
0,13	8413	9,62	12,85	0,34	19	4,65
0,11	6873	6,22	8,31	0,22	12	4,52
0,084	5332	3,83	5,12	0,13	8	4,46
0,060	3792	1,96	2,62	0,039	4	4,42

Concluída a modelagem para obtenção do ângulo de deflexão do sensor curvado pela pressão exercida pelo escoamento do fluido dentro de uma tubulação, partiu-se para uma avaliação mais voltada para o aspecto operacional do sensor. Para este propósito, uma simulação do circuito eletrônico a ser implementado foi realizada via software LTSpice<sup>®</sup>.

Vale acrescentar que foi realizada outra abordagem de simulação computacional via software Ansys para avaliar o comportamento do sensor para medição do consumo de água em unidades autônomas considerando os resultados iniciais da caracterização eletromecânica. Consequentemente, essa abordagem resultou em um artigo no evento *XXIII IMEKO World Congress “Measurement: sparking tomorrow’s smart revolution”* sob o título: “*Electromechanical characterization of resistive sensor for application in water metering*” (Anexo E).

### 4.3. Simulação em LTSpice®

Conforme mencionado anteriormente, apenas os sensores revestidos com poliéster foram utilizados. Assim, ressalta-se que a principal finalidade de simular computacionalmente o circuito eletrônico foi obter uma relação entre a tensão oriunda do *bend sensor* com a vazão do escoamento da água.

Logo, considerando o sensor com uma polegada de comprimento, a equação (10) – obtida por meio da ferramenta Solver do software Excel® – apresenta os parâmetros estimados da função da equação (7) de modo a minimizar a soma quadrática dos erros.

$$R(\dot{q}) = 1,499 + 0,01462 e^{2,505 \dot{q}}, \quad (10)$$

Desse modo, a Figura 55 apresenta a resposta da resistência obtida na simulação via Ansys ( $R_s$ ) em função da vazão e a curva de ajuste – com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9995.

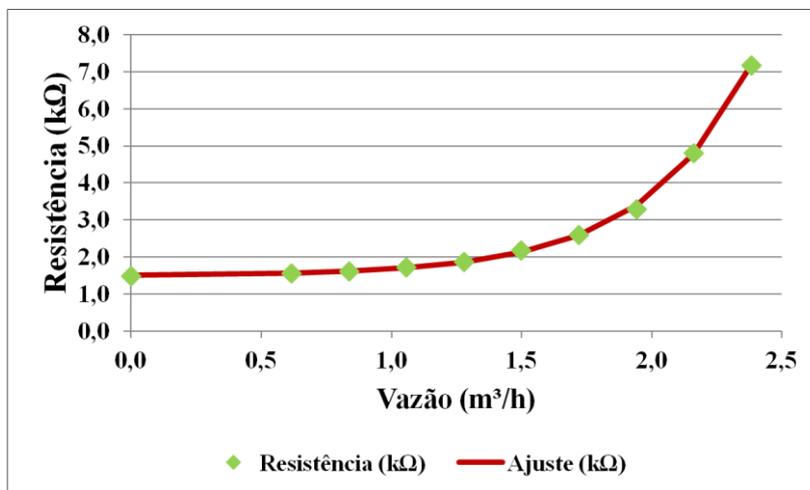


Figura 55 – Resposta da resistência em função da vazão: via simulação (verde) e regressão (vermelho).

Diante disso, tem-se a seguir a configuração do circuito eletrônico e dos condicionadores de sinal apresentada na Figura 56.

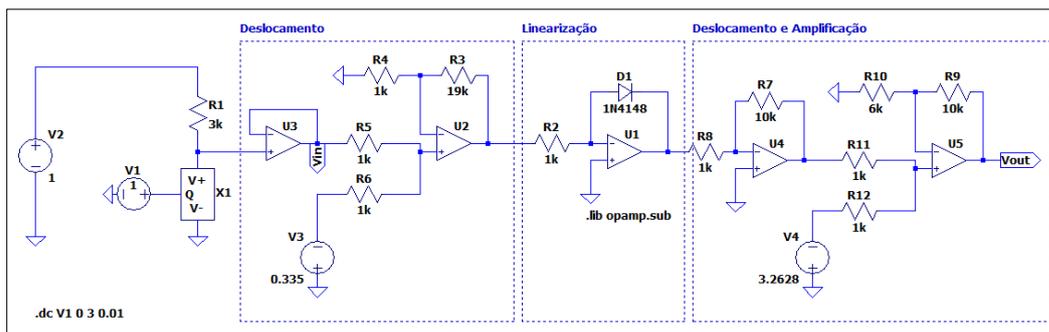


Figura 56 – Esquema do circuito eletrônico e dos condicionadores de sinal.

O circuito do *bend sensor* foi configurado com a equação (10) e o sinal gerado (X1) passou pelo divisor de tensão (primeiro bloco da Figura 56), que transformou o sinal de resistência em tensão e maximizou a faixa de sensibilidade de deflexão ( $R1=3\text{ k}\Omega$ ). Após isso, o sinal passou por um deslocamento de 0,335 V (V3), um ganho de 20 V/V ( $1+R3/R4$ ) e um processo de linearização (bloco “linearização” da Figura 56). Por fim, passou novamente por um deslocamento (V4) e um ganho ( $1+R9/R10$ ) de 3,2628 V e 2,6667 V/V, respectivamente.

Uma vez gerada a configuração acima, de posse dos dados obtidos a partir da simulação do circuito e dos condicionadores, foi possível auferir uma relação da tensão com a vazão, conforme apresentado na Figura 57.

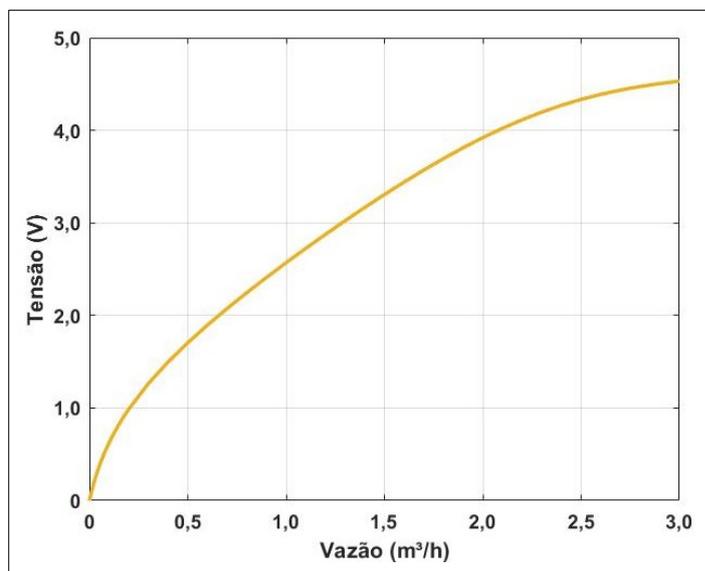


Figura 57 – Relação entre a tensão do *bend sensor* revestido de poliéster com uma polegada de comprimento em função da vazão.

Por fim, conforme apresentado na seção 3.4, esta relação entre tensão e vazão foi utilizada para treinar uma rede neural artificial que, ao receber os valores de tensão, estimou os valores de vazão instantânea. Os resultados do treinamento da rede para o sensor de uma polegada de comprimento são apresentados na Figura 58.

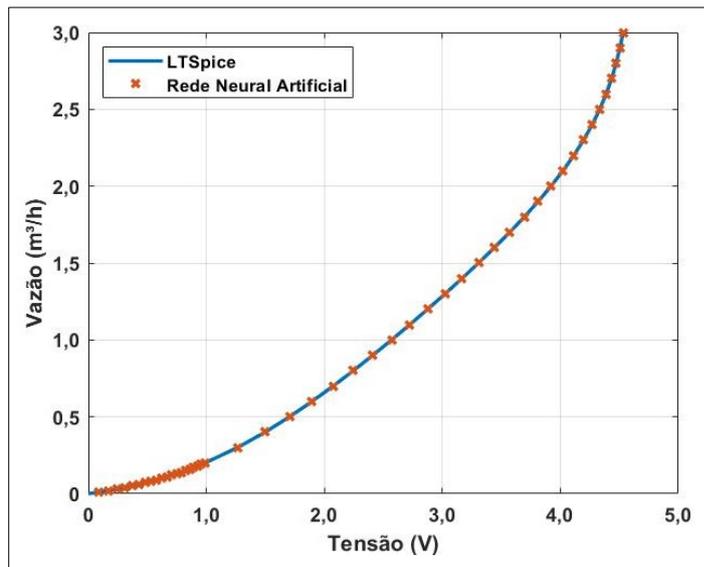


Figura 58 – Resultado do treinamento da rede para obtenção da vazão instantânea a partir da tensão do *bend sensor* revestido de poliéster com uma polegada de comprimento.

Do mesmo modo, no que diz respeito ao sensor de duas polegadas de comprimento, apresentam-se na equação (11) os parâmetros estimados da função da equação (7) de modo a minimizar a soma quadrática dos erros.

$$R(\dot{q}) = 4,414 + 0,006622 e^{2,233 \dot{q}}, \quad (11)$$

A Figura 59 apresenta a resposta da resistência obtida na simulação via Ansys ( $R_S$ ) em função da vazão e a curva de ajuste – com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9992.

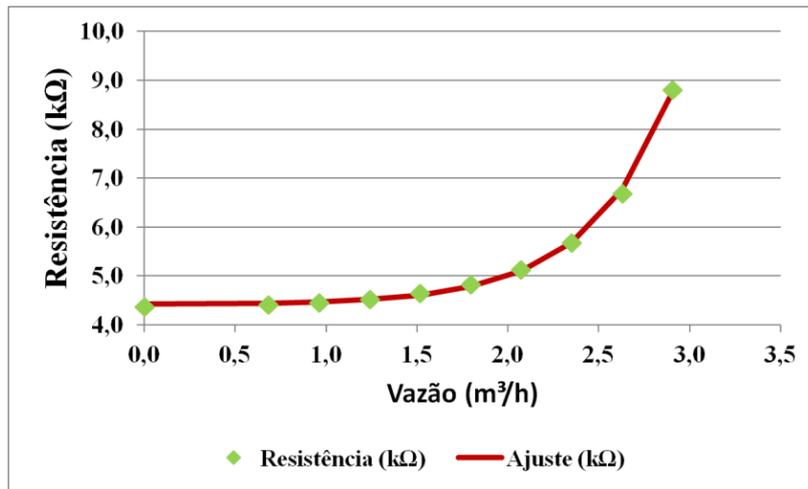


Figura 59 – Resposta da resistência em função da vazão: via simulação (verde) e regressão (vermelho).

Complementarmente, a configuração do circuito eletrônico e dos condicionadores de sinal é apresentada na Figura 60. O circuito do *bend sensor* foi configurado com a equação (11) e o sinal gerado (X1) passou pelo divisor de tensão (primeiro bloco da Figura 60), que transformou o sinal de resistência em tensão e maximizou a faixa de sensibilidade de deflexão ( $R1=6\text{ k}\Omega$ ). Após isso, o sinal passou por um deslocamento de  $0,424\text{ V}$  ( $V3$ ), um ganho de  $43\text{ V/V}$  ( $1+R3/R4$ ) e um processo de linearização (bloco “linearização” da Figura 60). Por fim, passou novamente por um deslocamento ( $V4$ ) e um ganho ( $1+R9/R10$ ) de  $3,44\text{ V}$  e  $3\text{ V/V}$ , respectivamente.

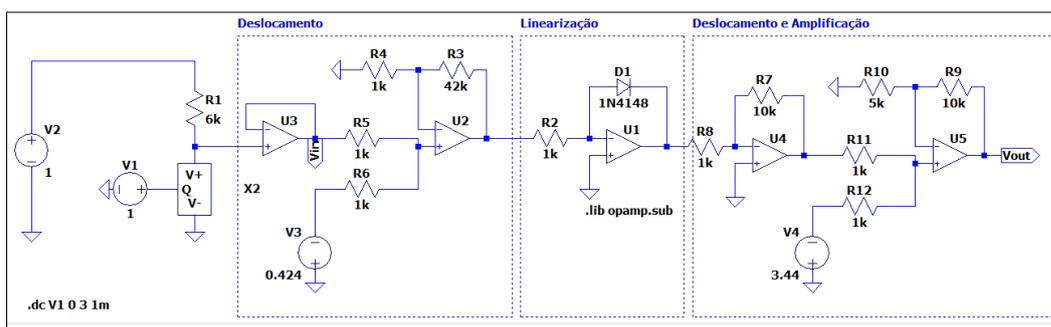


Figura 60 – Esquema do circuito eletrônico e dos condicionadores de sinal.

A relação obtida entre a tensão proveniente do sensor e a vazão do escoamento simulado está apresentada na Figura 61.

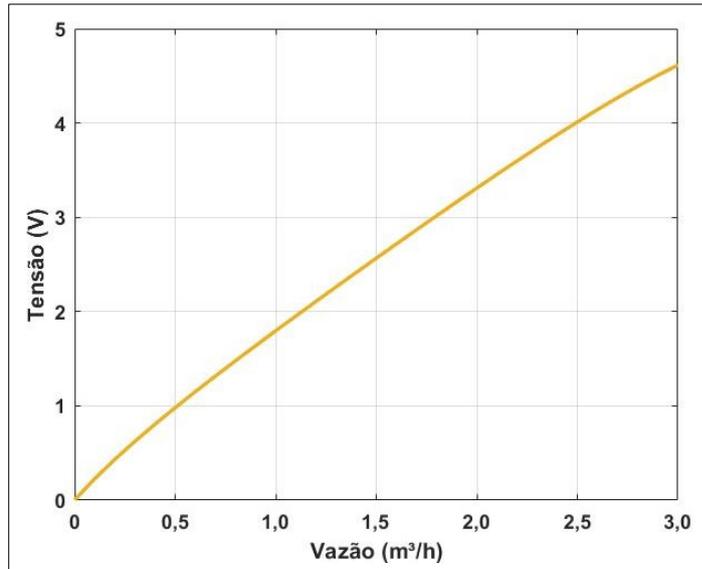


Figura 61 – Relação entre a tensão do *bend sensor* revestido de poliéster com duas polegadas de comprimento em função da vazão.

Por último, os resultados do treinamento da rede neural artificial para o sensor de duas polegadas de comprimento são apresentados na Figura 62.

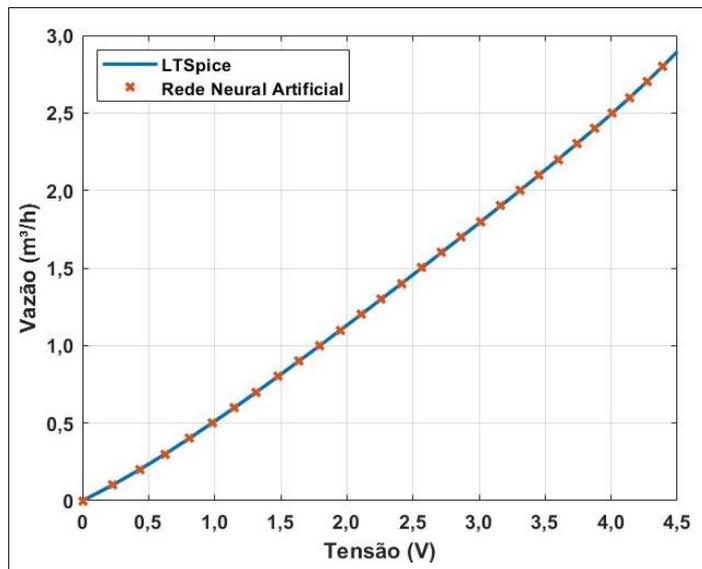


Figura 62 – Resultado do treinamento da rede para obtenção da vazão instantânea a partir da tensão do *bend sensor* revestido de poliéster com uma polegada de comprimento.

Em suma, para ambos os sensores com revestimento de poliéster, a simulação computacional do circuito eletrônico no software LTSpice® resultou um sinal elétrico de tensão com maior intensidade, melhor relação sinal-ruído (ou

seja, menos ruído sobreposto ao sinal) e o mais linear possível, devido aos processos de amplificação e linearização. Por sua vez, a rede neural artificial foi treinada para, a partir do sinal elétrico de tensão, obter as vazões instantâneas, e os resultados obtidos apresentaram um comportamento promissor na utilização destes sensores para medição do consumo hídrico em unidades autônomas.

Neste sentido, como um hidrômetro, conceitualmente, é um instrumento designado para medição e indicação contínua do volume de água escoado, o medidor proposto neste trabalho necessita indicar volume ao invés de vazão. Por este motivo, na etapa seguinte foi realizada uma estimativa do volume.

#### 4.4. Simulação da Operação do Medidor

Conforme explicado na seção 3.5, pulsos trapezoidais foram gerados a partir da curva de vazão de uma torneira e de um chuveiro convencional. Além disso, foram consideradas duas unidades de um edifício com 12 andares, uma no quarto andar e outra no décimo primeiro. O pulso trapezoidal da torneira para a unidade autônoma situada no quarto andar é apresentado na Figura 63, e possui flutuações em torno da vazão de 9,5 L/min (0,57 m<sup>3</sup>/h).

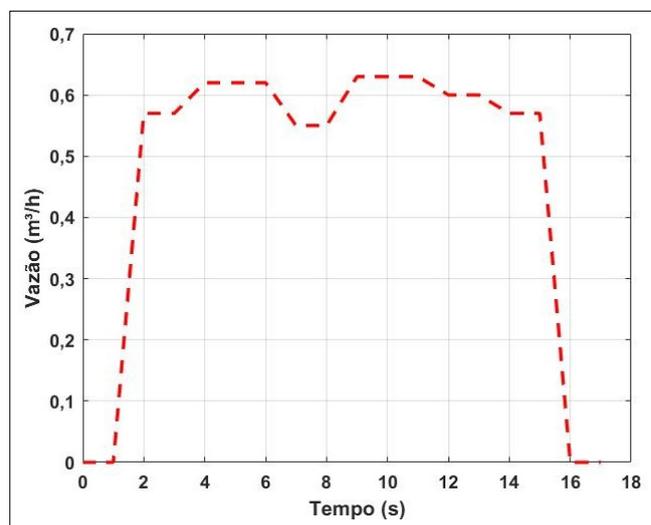


Figura 63 – Pulso trapezoidal da torneira para a unidade do 4º andar.

Por sua vez, o pulso trapezoidal do chuveiro tradicional para a mesma unidade é apresentado na Figura 64, e possui flutuações por volta da vazão de 24 L/min (1,44 m<sup>3</sup>/h).

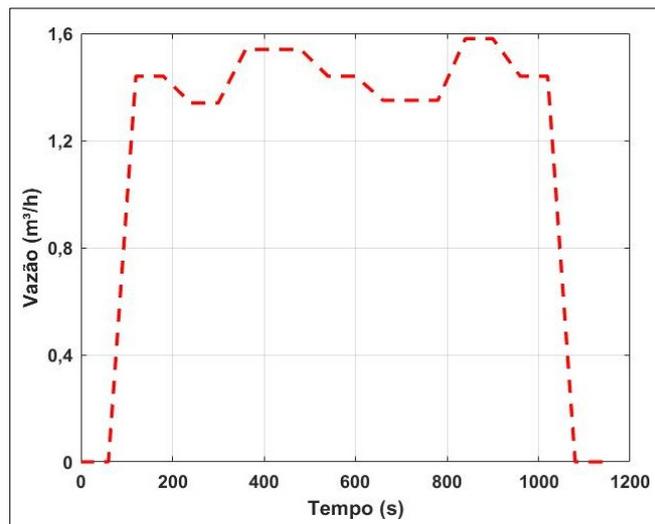


Figura 64 – Pulso trapezoidal do chuveiro tradicional para a unidade do 4º andar.

No que diz respeito à unidade autônoma do décimo primeiro andar, o pulso trapezoidal da torneira é apresentado na Figura 65, e possui flutuações em torno da vazão de 3 L/min (0,18 m³/h).

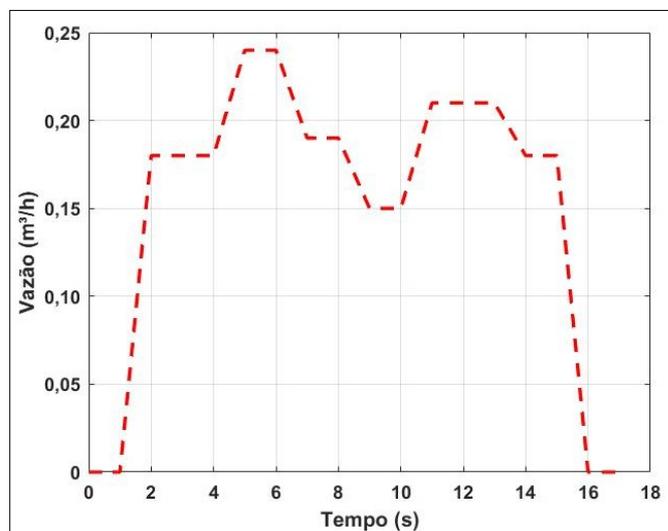


Figura 65 – Pulso trapezoidal da torneira para a unidade do 11º andar.

Ao passo que o pulso trapezoidal do chuveiro tradicional para a mesma unidade é apresentado na Figura 66, e possui flutuações por volta da vazão de 20,5 L/min (1,23 m³/h).

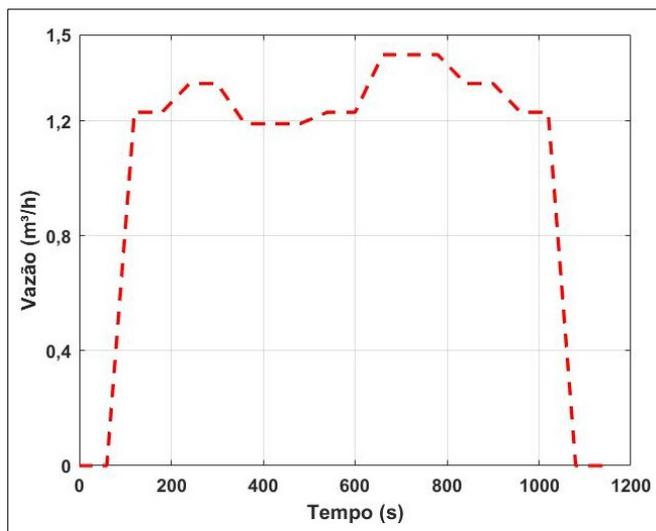


Figura 66 – Pulso trapezoidal do chuveiro tradicional para a unidade do 11º andar.

#### 4.4.1. **Bend sensor com uma polegada de comprimento**

- Unidade autônoma do quarto andar:

Os resultados da simulação do sensor – revestido de poliéster com uma polegada de comprimento – perante o acionamento da torneira são apresentados na Figura 67 e na Figura 68.

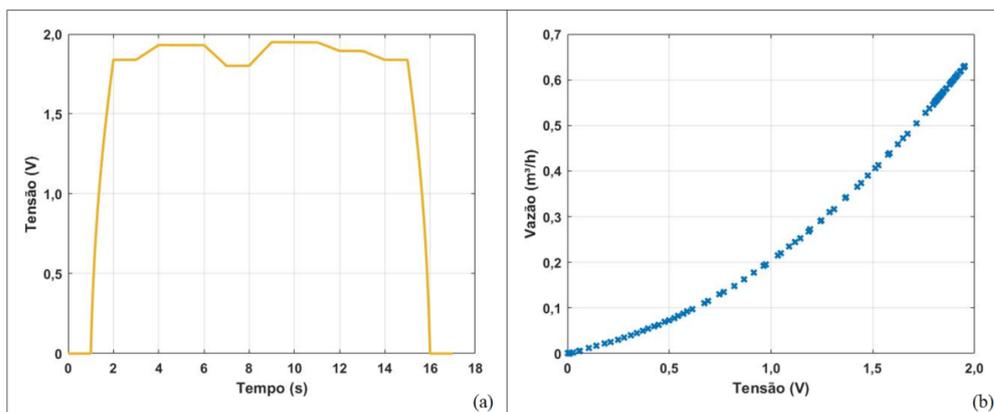


Figura 67 – Resposta do sensor perante o acionamento da torneira: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento da torneira; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial.

Na Figura 67(a) mostra-se a resposta do sinal elétrico de tensão em função do tempo de funcionamento da torneira. Por sua vez, a Figura 67(b) expõe o resultado das vazões obtidas via rede neural artificial treinada.

Complementarmente, a Figura 68 apresenta uma comparação entre o pulso trapezoidal gerado pela simulação do sensor resistivo via software LTSpice® (curva azul) e pela curva de vazão da torneira (curva tracejada vermelha). Além disso, para o hidrômetro proposto, é necessário estimar o volume de água escoado durante o acionamento de 15 segundos da torneira. Então, conforme explicado na seção 3.5, o volume foi estimado por meios diferentes a partir das vazões encontradas. O primeiro método, que foi o cálculo analítico do pulso trapezoidal teórico (curva de vazão da torneira), resultou em um volume de 0,002314 m<sup>3</sup> (2,314 L). E, o segundo, que foi o cálculo numérico do pulso trapezoidal obtido via simulação do sensor, resultou em 0,002312 m<sup>3</sup> (2,312 L) de volume escoado.

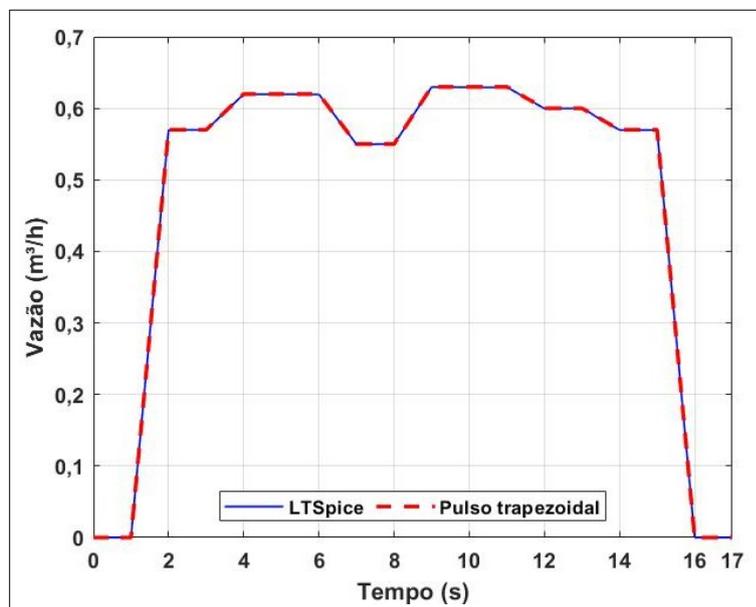


Figura 68 – Pulso trapezoidal via: simulação do *bend sensor* no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão da torneira para a unidade autônoma com 24 m.c.a (curva vermelha tracejada).

Em relação ao acionamento do chuveiro tradicional, os resultados da simulação do sensor são apresentados na Figura 69 e na Figura 70. Na Figura 69(a) é mostrada a resposta do sinal elétrico de tensão em função do tempo de funcionamento do chuveiro convencional. Por sua vez, a Figura 69(b) expõe o resultado das vazões obtidas via rede neural artificial treinada.

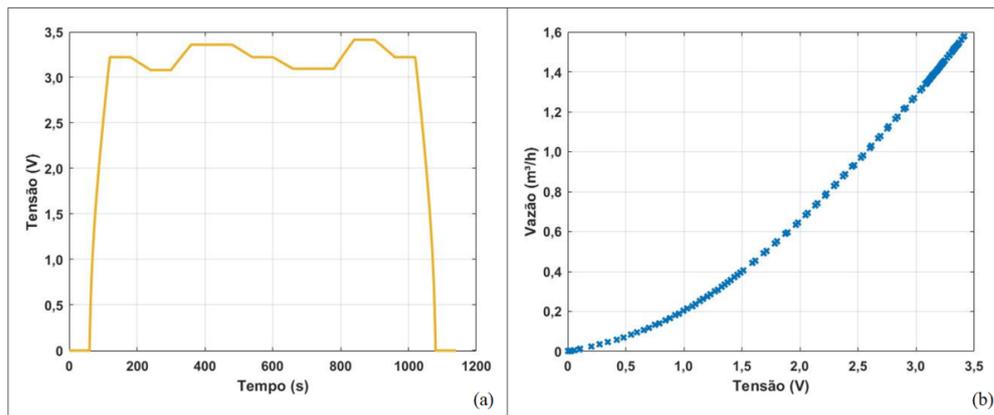


Figura 69 – Resposta do sensor perante o acionamento do chuveiro tradicional: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento do chuveiro; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial.

Adicionalmente, a Figura 70 apresenta uma comparação entre o pulso trapezoidal gerado pela simulação do sensor resistivo via software LTSpice® (curva azul) e pela curva de vazão do chuveiro (curva tracejada vermelha). Pelo cálculo analítico, o volume de água escoado durante o acionamento do chuveiro tradicional para um banho de 15 minutos foi igual a 0,38583 m³ (385,83 L), e pelo cálculo numérico foi igual a 0,38580 m³ (385,80 L).

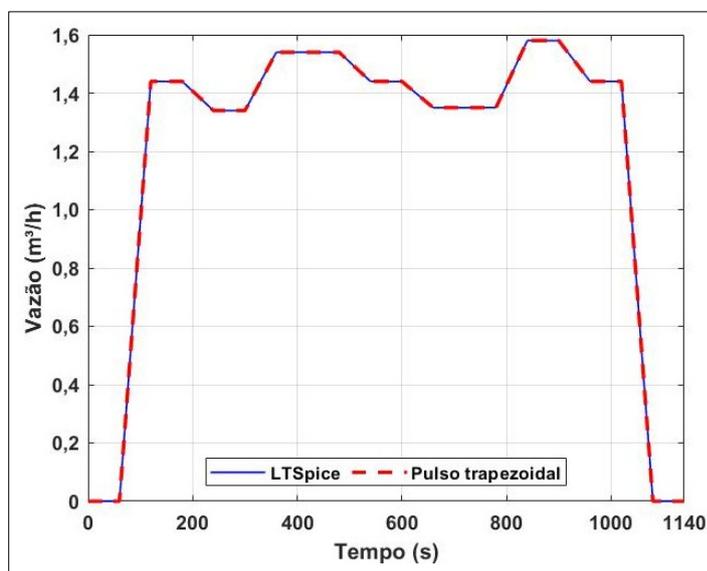


Figura 70 – Pulso trapezoidal via: simulação do *bend sensor* no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão do chuveiro tradicional para a unidade autônoma com 24 m.c.a (curva vermelha tracejada).

- Unidade autônoma do décimo primeiro andar:

No que diz respeito ao acionamento da torneira, os resultados da simulação do sensor são apresentados na Figura 71 e na Figura 72. Na Figura 71(a) mostra-se a resposta do sinal elétrico de tensão em função do tempo de funcionamento da torneira. Por sua vez, a Figura 71(b) expõe o resultado das vazões obtidas via rede neural artificial treinada.

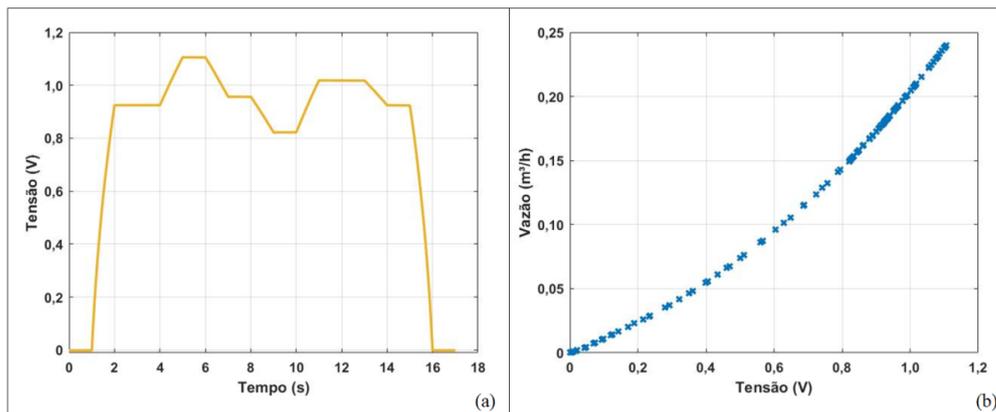


Figura 71 – Resposta do sensor perante o acionamento da torneira: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento da torneira; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial.

Além disso, a Figura 72 apresenta uma comparação entre o pulso trapezoidal gerado pela simulação do sensor resistivo via software LTSpice<sup>®</sup> (curva azul) e pela curva de vazão da torneira (curva tracejada vermelha). Pelo cálculo analítico, o volume de água escoado durante o acionamento da torneira por 15 segundos foi igual a  $7,472 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  (0,07472 L), e pelo cálculo numérico foi igual a  $7,476 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  (0,07476 L).

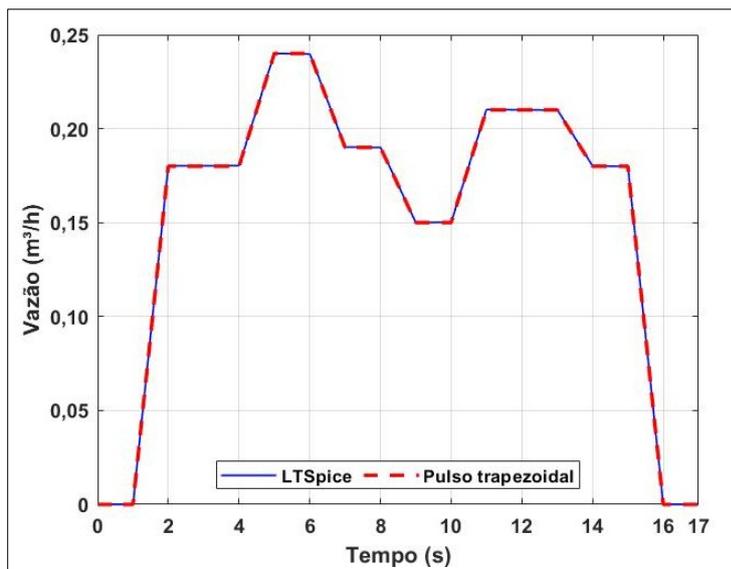


Figura 72 – Pulso trapezoidal via: simulação do *bend sensor* no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão da torneira para a unidade autônoma com 3 m.c.a (curva vermelha tracejada).

Por sua vez, os resultados da simulação do sensor perante o acionamento do chuveiro tradicional são apresentados na Figura 73 e na Figura 74. Na Figura 73(a) é mostrada a resposta do sinal elétrico de tensão em função do tempo de funcionamento do chuveiro. Por sua vez, a Figura 73(b) expõe o resultado das vazões obtidas via rede neural artificial treinada.

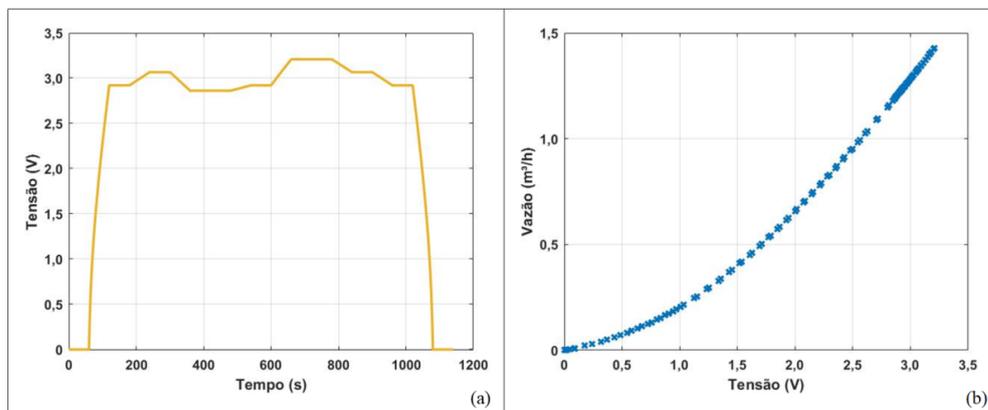


Figura 73 – Resposta do sensor perante o acionamento do chuveiro tradicional: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento do chuveiro; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial.

Além disso, a Figura 74 apresenta uma comparação entre o pulso trapezoidal gerado pela simulação do sensor resistivo via software LTSpice® (curva azul) e pela curva de vazão do chuveiro (curva tracejada vermelha). Pelo

cálculo analítico, o volume de água escoado durante o acionamento do chuveiro para um banho de 15 minutos foi igual a 0,3427 m<sup>3</sup>(342,7 L), e pelo cálculo numérico foi igual a 0,3426 m<sup>3</sup> (342,6 L).

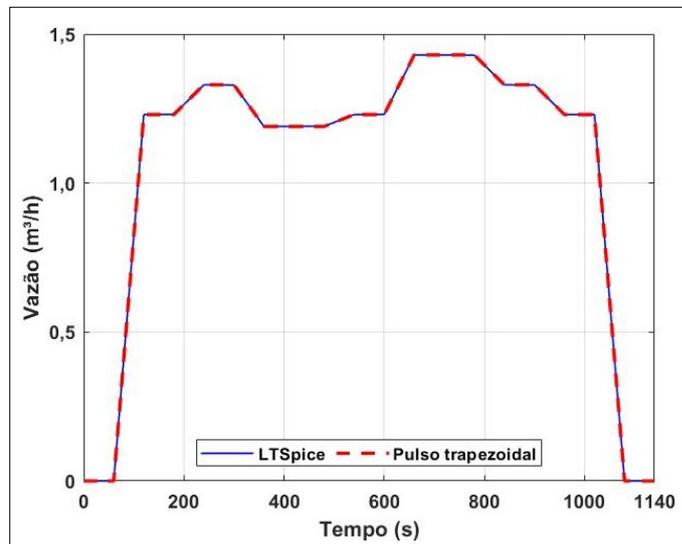


Figura 74 – Pulso trapezoidal via: simulação do *bend sensor* no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão do chuveiro tradicional para a unidade autônoma com 3 m.c.a (curva vermelha tracejada).

#### 4.4.2. *Bend sensor* com duas polegadas de comprimento

- Unidade autônoma do quarto andar:

Os resultados da simulação do sensor (revestido de poliéster com duas polegadas de comprimento) perante o acionamento da torneira são apresentados na Figura 75 e na Figura 76.

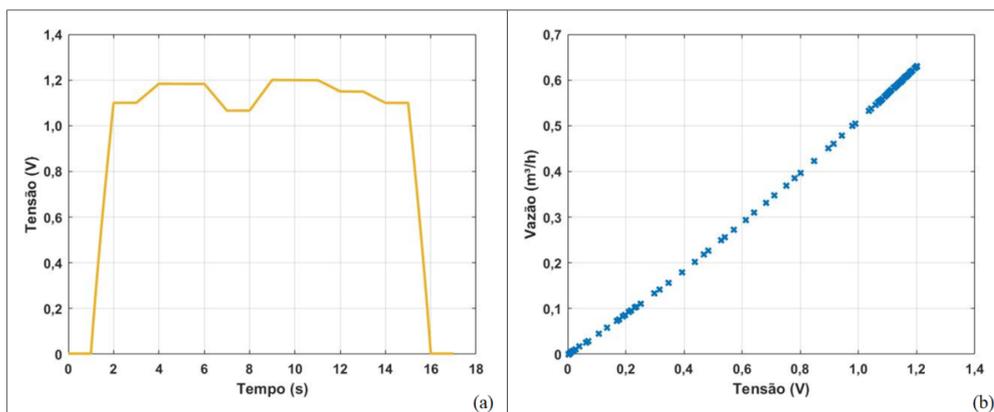


Figura 75 – Resposta do sensor perante o acionamento da torneira: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento da torneira; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial.

Na Figura 75(a) mostra-se a resposta do sinal elétrico de tensão em função do tempo de funcionamento da torneira. Por sua vez, a Figura 75(b) expõe o resultado das vazões obtidas via rede neural artificial treinada.

Já na Figura 76, apresenta-se uma comparação entre o pulso trapezoidal gerado pela simulação do sensor resistivo via software LTSpice® (curva azul) e pela curva de vazão da torneira (curva tracejada vermelha). Além disso, para o hidrômetro proposto, é necessário estimar o volume de água escoado durante o acionamento de 15 segundos da torneira. Então, conforme explicado na seção 3.5, o volume foi estimado por meios diferentes a partir das vazões encontradas. O primeiro método, que foi o cálculo analítico do pulso trapezoidal teórico (curva de vazão da torneira), resultou em um volume de 0,002314 m<sup>3</sup> (2,314 L). E, o segundo método, que foi o cálculo numérico do pulso trapezoidal obtido via simulação do sensor, resultou em 0,002313 m<sup>3</sup> (2,313 L) de volume escoado.

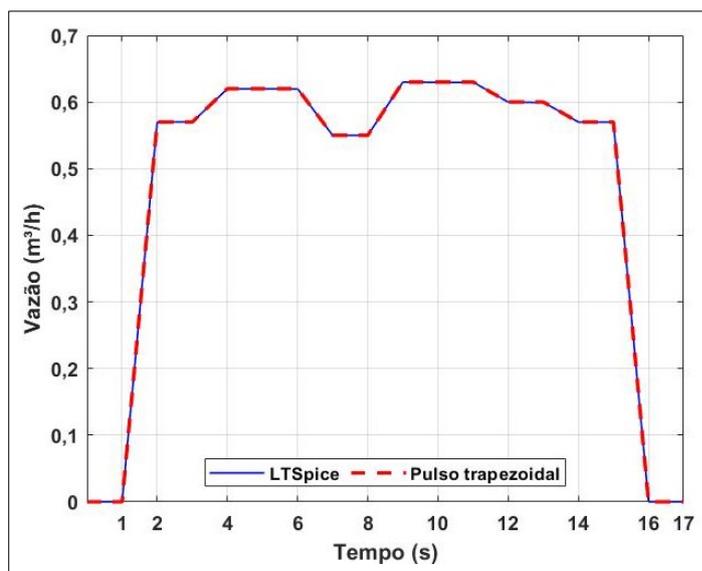


Figura 76 – Pulso trapezoidal via: simulação do *bend sensor* no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão da torneira para a unidade autônoma com 24 m.c.a (curva vermelha tracejada).

Em relação ao acionamento do chuveiro tradicional, os resultados da simulação do sensor são apresentados na Figura 77 e na Figura 78. Na Figura 77(a) mostra-se a resposta do sinal elétrico de tensão em função do tempo de funcionamento do chuveiro convencional. Por sua vez, a Figura 77(b) expõe o resultado das vazões obtidas via rede neural artificial treinada.

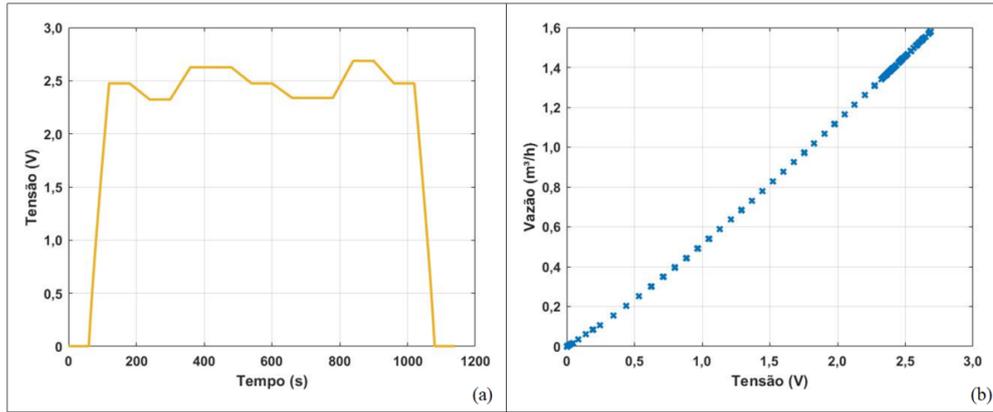


Figura 77 – Resposta do sensor perante o acionamento do chuveiro tradicional: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento do chuveiro; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial.

Na Figura 78 apresenta-se uma comparação entre o pulso trapezoidal gerado pela simulação do sensor resistivo via software LTSpice® (curva azul) e pela curva de vazão do chuveiro (curva tracejada vermelha). Pelo cálculo analítico, o volume de água escoado durante o acionamento do chuveiro tradicional para um banho de 15 minutos foi igual a 0,38583 m³ (385,83 L), e pelo cálculo numérico foi igual a 0,38579 m³ (385,79 L).

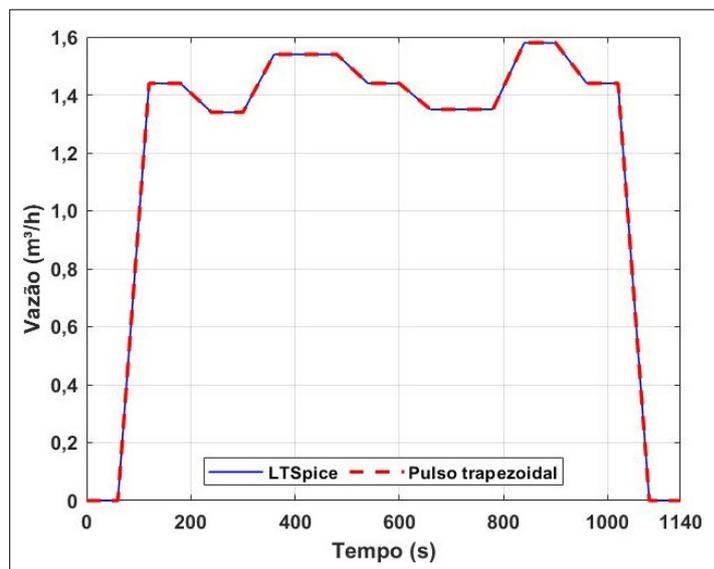


Figura 78 – Pulso trapezoidal via: simulação do *bend sensor* no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão do chuveiro tradicional para a unidade autônoma com 24 m.c.a (curva vermelha tracejada).

- Unidade autônoma do décimo primeiro andar:

No que diz respeito ao acionamento da torneira, os resultados da simulação do sensor são apresentados na Figura 79 e na Figura 80. Na Figura 79(a) mostra-se a resposta do sinal elétrico de tensão em função do tempo de funcionamento da torneira. Por sua vez, a Figura 79(b) expõe o resultado das vazões obtidas via rede neural artificial treinada.

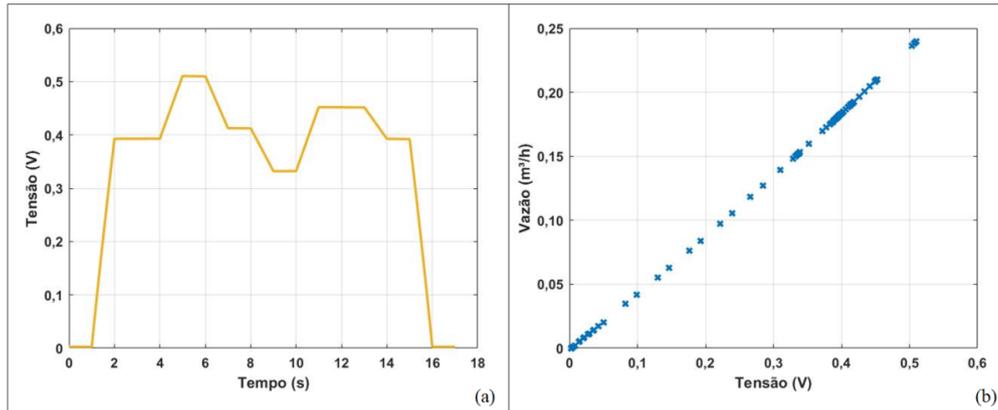


Figura 79 – Resposta do sensor perante o acionamento da torneira: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento da torneira; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial.

Na Figura 80 apresenta-se uma comparação entre o pulso trapezoidal gerado pela simulação do sensor resistivo via software LTSpice® (curva azul) e pela curva de vazão da torneira (curva tracejada vermelha). Pelo cálculo analítico, o volume de água escoado durante o acionamento da torneira por 15 segundos foi igual a  $7,472 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  (0,07472 L), e pelo cálculo numérico foi igual a  $7,466 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  (0,07466 L).

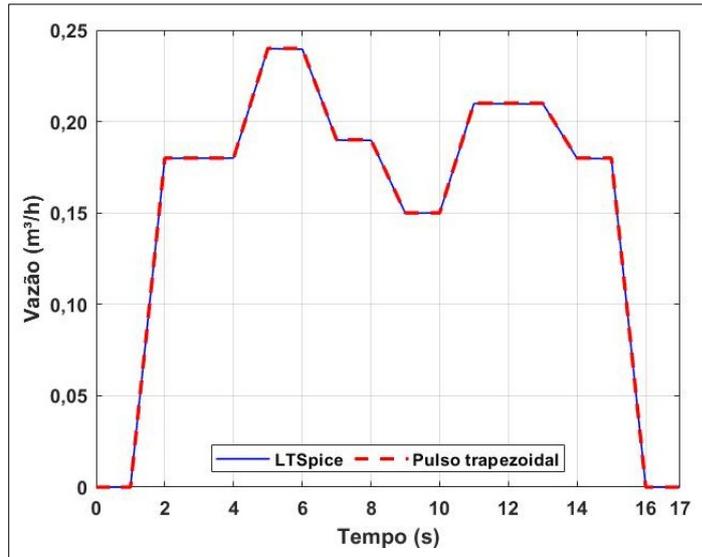


Figura 80 – Pulso trapezoidal via: simulação do *bend sensor* no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão da torneira para a unidade autônoma com 3 m.c.a (curva vermelha tracejada).

Finalmente, os resultados da simulação do sensor perante o acionamento do chuveiro tradicional são apresentados na Figura 81 e na Figura 82. Na Figura 81(a) é mostrada a resposta do sinal elétrico de tensão em função do tempo de funcionamento do chuveiro. Por sua vez, a Figura 81(b) expõe o resultado das vazões obtidas via rede neural artificial treinada.

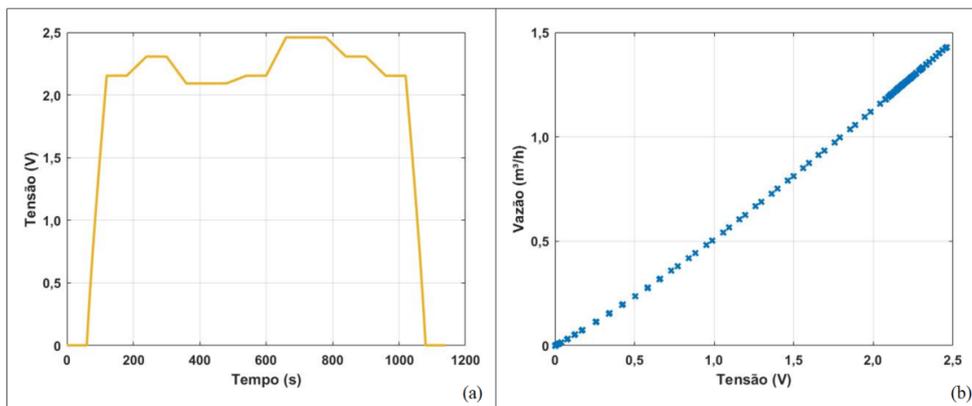


Figura 81 – Resposta do sensor perante o acionamento do chuveiro tradicional: (a) Tensão em função do tempo de funcionamento do chuveiro; (b) Vazão auferida por meio da rede neural artificial.

Na Figura 82 apresenta-se uma comparação entre o pulso trapezoidal gerado pela simulação do sensor resistivo via software LTSpice® (curva azul) e pela curva de vazão do chuveiro (curva tracejada vermelha). Pelo cálculo analítico, o volume de água escoado durante o acionamento do chuveiro para um banho de 15

minutos foi igual a  $0,3427 \text{ m}^3$  (342,7 L), e pelo cálculo numérico foi igual a  $0,3426 \text{ m}^3$  (342,6 L).

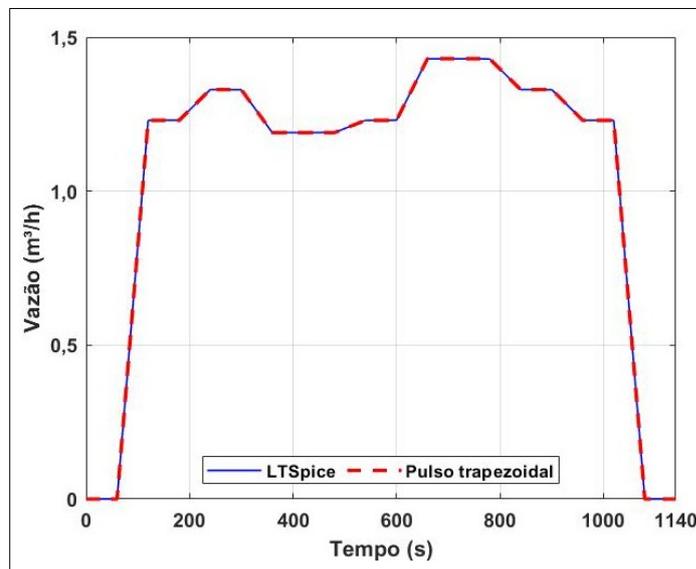


Figura 82 – Pulso trapezoidal via: simulação do *bend sensor* no LTSpice® (curva azul) e curva de vazão do chuveiro tradicional para a unidade autônoma com 3 m.c.a (curva vermelha tracejada).

Em síntese, estes cálculos possibilitaram comparar por dois modelos o cálculo do volume. Com isso, foi possível realizar uma validação simulada do conceito de medição.

Perante o exposto, pode-se afirmar que estes resultados corroboram a viabilidade da aplicação deste tipo de sensor resistivo com revestimento de poliéster, com a finalidade de realizar medições do volume escoado de água dentro de tubulações em unidades autônomas prediais.

Além disso, resumidamente, a Tabela 6 apresenta por quais etapas cada sensor avaliado passou, qual *setup* foi utilizado em cada etapa e, por fim, quais os sensores mais adequados para serem utilizados na proposta de construção do medidor de consumo de água em prédios, que neste caso foram os sensores com revestimento de poliéster.

Tabela 6 – Resumo das etapas de avaliação dos sensores resistivos de filme fino.

	Método	1 polegada			2 polegadas		
		Poliéster	Poliimida	Sem revestimento	Poliéster	Poliimida	Sem revestimento
Caracterização eletromecânica	A	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	B	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	C	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Caracterização eletrotérmica	A	✓	✓		✓	✓	
Simulação Ansys	B	✓			✓		
Simulação LTSpice <sup>®</sup>		✓					
Estimativa do volume		✓					

Por fim, vale ressaltar que os processos de medição realizados nesta dissertação podem ter sido afetados por algumas fontes de erros, consequentemente, gerando erros sistemáticos e/ou erros aleatórios. Por exemplo, na caracterização eletromecânica: sabe-se que o *bend sensor* é um sensor resistivo que é afetado pela variação da temperatura – um fator externo ao sistema de medição, e nesta caracterização não ocorreu um controle da temperatura ao realizar todas as caracterizações dos sensores. Adicionalmente, destacam-se as fontes de incerteza que, neste trabalho, são oriundas das medições da resistência (incerteza tipo A) e dos instrumentos e equipamento utilizados nas caracterizações (incerteza tipo B).

## 5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Esta pesquisa contribuiu para a propagação da informação sobre Sistema de Medição Individualizada de Água (SMI de água) e suas implicações na sociedade, tais como falta de regulamentação específica e outras deficiências, como a dificuldade de instalação de medidores individuais em edifícios antigos – construídos antes da Lei nº 13.312, de 2016 entrar em vigor – com muitos pavimentos, a partir de um amplo estudo exploratório de caracterização e simulação de um sensor resistivo (*bend sensor*) para medição de volume em unidades autônomas, que permitiu o avanço do conhecimento acerca das tecnologias dos hidrômetros.

Resumidamente, foram realizadas caracterizações eletromecânica e térmica do *bend sensor*, nas quais foi possível observar que a primeira não considera o efeito da temperatura e, conseqüentemente, para fins do hidrômetro proposto, o teste de caracterização eletrotérmico é mais significativo, pois se assemelha mais com a realidade das tubulações prediais, com isso, os sensores com revestimento de poliéster apresentaram um comportamento mais estável em comparação aos de poliimida. Em face destas informações, partiu-se para simulações computacionais via softwares Ansys e LTSpice® e treinamento de uma rede neural artificial (RNA). A simulação via software Ansys foi implementada para simular computacionalmente a flexão do sensor provocada pelo escoamento da água na tubulação e isso gerou uma relação entre o ângulo de deflexão do sensor e a vazão. A simulação LTSpice® teve o propósito de avaliar o circuito eletrônico do hidrômetro proposto e resultou em um sinal de tensão com maior faixa de sensibilidade e melhor relação sinal-ruído. A RNA foi utilizada para obter o sinal de vazão em função da tensão e isso resultou em uma rede treinada que, ao receber os valores de tensão, estima os valores de vazão instantânea. Com isso, foi possível obter a validação da aplicabilidade do sensor resistivo de filme fino como transdutor do medidor proposto para medição do volume de água

escoado em uma tubulação de unidades autônomas utilizando válvulas de controle de fluxo que já estão presentes na instalação hidráulica do edifício. Sendo assim, o objetivo geral desta pesquisa foi atingido.

Como primeiro objetivo específico deste trabalho, seis sensores resistivos de filme fino (*bend sensor*) com diferentes tamanhos – 1 polegada e 2 polegadas – e distintos revestimentos – com poliéster, com poliimida e sem revestimento – foram caracterizados visando relacionar a resistência do sensor com seu ângulo de flexão e, para isso, foram desenvolvidos e testados três métodos de caracterização. Ao comparar os resultados, a caracterização eletromecânica possibilitou identificar que o ‘Método B’, em média, apresentou uma menor histerese, indicando ser o mais adequado para caracterizar os sensores. Além disso, considerando apenas este método, observou-se que o sensor revestido com poliimida e com uma polegada de comprimento apresentou um menor valor de histerese.

Adicionalmente, na caracterização eletrotérmica foram caracterizados os sensores com comprimentos de 1 e 2 polegadas e com revestimento de poliéster e de poliimida. A metodologia permitiu avaliar o comportamento da resistência do sensor quando submetido à variação de temperatura. Neste caso, os sensores revestidos de poliéster demonstraram excelente desempenho – com o aumento da temperatura a resistência diminuiu. Em contrapartida, os sensores revestidos por poliimida apresentaram um comportamento irregular, apesar deste tipo de polímero ser excelente para aplicações com variação de temperatura – o comportamento da alteração da resistência com a mudança de temperatura foi diferente para os ângulos de rotação do sensor, fazendo com que fosse necessário caracterizar um novo *bend sensor* com revestimento de poliimida para fins de ratificação. Neste caso, foi utilizado um sensor reserva com duas polegadas de comprimento, sendo que este também apresentou os mesmos resultados irregulares. Portanto, considerando a aplicação pretendida do hidrômetro proposto, os sensores resistivos revestidos de poliéster, tanto de uma polegada quanto o de duas, demonstraram uma melhor viabilidade para serem utilizados como transdutores.

No que concerne ao segundo objetivo específico, a simulação computacional via Ansys foi fundamental para a obtenção da relação do ângulo de

deflexão do sensor, que é curvado pela pressão exercida pelo escoamento do fluido dentro de uma tubulação. O sensor revestido de poliéster com 1 polegada de comprimento foi simulado utilizando uma variação de velocidade entre 0,15 m/s e 0,58 m/s. Este sensor apresentou uma variação da deflexão entre 5° e 69° e da resistência ( $R_s$ ) entre 1,56 k $\Omega$  e 7,18 k $\Omega$ . Já o sensor de 2 polegadas e com o mesmo revestimento foi simulado utilizando uma variação de velocidade entre 0,060 m/s e 0,26 m/s. Este sensor apresentou uma variação da deflexão entre 4° e 70° e da resistência ( $R_s$ ) entre 4,42 k $\Omega$  e 8,81 k $\Omega$ . Estas velocidades são relevantes para a instalação de tubulações em edifícios. No Brasil, por exemplo, a velocidade dentro da tubulação não pode ultrapassar 3 m/s [66].

No que diz respeito ao terceiro objetivo específico, que trata do princípio de funcionamento do medidor proposto, realizou-se uma simulação do circuito eletrônico via software LTSpice<sup>®</sup>. Para ambos os sensores, a simulação resultou um sinal elétrico de tensão com maior intensidade, melhor relação sinal-ruído e o mais linear possível, em consequência dos processos de amplificação e linearização. Por sua vez, uma rede neural artificial foi treinada para, a partir do sinal elétrico de tensão, obter as vazões instantâneas, e os resultados obtidos apresentaram um comportamento promissor na utilização destes sensores para a aplicação desejada.

Como quarto objetivo específico, realizou-se a validação simulada do conceito de medição, sendo consideradas duas unidades autônomas – uma no 4° andar e outra no 11° andar – e sendo utilizados dois sistemas hidráulicos – uma torneira com acionamento de 15 segundos e um chuveiro tradicional funcionando por 15 minutos – para validar as simulações realizadas e estimar o volume a partir das vazões dos sistemas hidráulicos. Para isso, foram efetuados dois cálculos por meios diferentes, o primeiro por cálculos analíticos e o segundo por cálculos numéricos. Esses resultados obtidos foram muito similares, o que permitiu validar as simulações realizadas via software Ansys e LTSpice<sup>®</sup> e a rede neural artificial treinada. O sensor de uma polegada de comprimento apresentou uma faixa de medição entre 0 m<sup>3</sup>/h e 3 m<sup>3</sup>/h (Figura 58) e, segundo os resultados das simulações, este sensor mostrou ser capaz de medir as vazões dos sistemas hidráulicos considerados, ou seja, demonstrou ser adequado para funcionar para a aplicação proposta nessa dissertação, assim como o sensor de duas polegadas, que

também apresentou uma faixa de medição entre 0 m<sup>3</sup>/h e 2,7 m<sup>3</sup>/h (Figura 62) e demonstrou ser adequado para a aplicação pretendida. Além disso, considerando a Portaria INMETRO nº 246, de 17 de outubro de 2000 [13], as faixas de medição de ambos os sensores são relevantes para hidrômetros, pois esse regulamento estabelece condições para medidores de volume de água com vazão nominal de 0,6 m<sup>3</sup>/h a 15,0 m<sup>3</sup>/h.

Diante disso, como quinto objetivo específico, foi possível definir o conceito do medidor, por meio da inserção do *bend sensor* no interior da válvula para que a mesma seja adaptada de modo a funcionar como um medidor volumétrico. Para isso, projetou-se uma peça fixa dentro da tampa da válvula, conforme apresentado na Figura 16, com a finalidade de funcionar como suporte para o sensor, e para sua fixação nesta peça sugeriu-se a utilização de resina epóxi, por ser altamente resistente e endurecer até na água, assim como foi feito no estudo de Xu *et al.* [26]. Além disso, em termos práticos, visando padronizar o modelo de medidor proposto, foi pontuada a necessidade da fabricação de uma cunha com um furo na lateral para a passagem da peça de suporte e uma abertura no centro para permitir espaço para o sensor, assim como apresentado na Figura 16(b).

Em suma, concluiu-se que a aplicação de sensores resistivos de filme fino com revestimento de poliéster mostra-se viável para a finalidade de realizar medições do volume escoado de água dentro de tubulações em unidades autônomas prediais. Inclusive, o hidrômetro proposto denota conformidade com a Portaria INMETRO nº 246, de 17 de outubro de 2000, sobre as condições que os medidores de volume de água potável fria que escoam em uma tubulação fechada devem satisfazer, e atende também o requisito quanto ao princípio de funcionamento, que segundo este regulamento deve ser elétrico, eletrônico ou mecânico.

Como sugestões de trabalhos futuros e recomendações gerais, propõem-se:

- A instrumentação da válvula gaveta por meio da inserção do *bend sensor* em seu interior, bem como a adaptação da mesma – conforme explicado – por meio da incorporação de uma peça fixa e de uma cunha de borracha com um furo na lateral e uma abertura no centro em substituição às cunhas existentes;

- A realização de testes em uma seção hidráulica para corroborar experimentalmente o potencial do *bend sensor* com revestimento de poliéster para medição de consumo hídrico em unidades autônomas prediais e avaliar o comportamento do sensor a longo prazo (vida útil);
- A realização de simulações adicionais implementando outros cenários, por exemplo, utilizando valores de vazões menores do que os que foram utilizados (vazamentos), considerando ar na tubulação, conforme ocorre na realidade e utilizando Ponte de Wheatstone no circuito eletrônico no LTSpice<sup>®</sup> ao invés do divisor de tensão;
- Para fins de desenvolvimento de um protótipo, projetar uma estrutura (caixa/bloco) para acondicionar a eletrônica de modo a atender às demais exigências da Portaria INMETRO nº 246, se adequando quanto aos outros requisitos sobre as inscrições e marcas obrigatórias que o hidrômetro deve possuir;
- Que empresas de água e saneamento do Brasil produzam conteúdos com orientações afins sobre a individualização dos medidores de consumo de água em unidades autônomas prediais (Anexo A), a exemplo da empresa EMBASA; e
- Que seja criada uma norma específica para a implementação do SMI de água em prédios antigos, dada a alta adesão que tem ocorrido ao sistema e às questões de segurança e custos envolvidos, especialmente no tocante às obras de instalação.

## 6

### Referências bibliográficas

- [1] ONU - Organização das Nações Unidas. **Declaração Universal dos Direitos Humanos da ONU**. Disponível em: <<https://www.oas.org/dil/port/1948%20Declara%C3%A7%C3%A3o%20Universal%20dos%20Direitos%20Humanos.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2020.
- [2] YANNOPOULOS, S.; GIANNOPOULOU, I.; KAIIFA-SAROPOULOU, M. Investigation of the current situation and prospects for the development of rainwater harvesting as a tool to confront water scarcity worldwide. **Water**, v. 11, n. 10, p. 2168, 18 out. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w11102168>>.
- [3] AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <<https://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use/>>. Acesso em: 11 mar. 2021.
- [4] ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual**. Brasília, p.118, 2020. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura-2020>>. Acesso em : 11 mar. 2021.
- [5] NATIONS, U. **The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water**. UNESCO, Paris, 2021.
- [6] GARDNER, J.; DOYLE, M.; PATTERSON, L. **Estimating the value of public water data**. (Durham, NC: Duke University), p 16, 2017.
- [7] ALI, A. *et al.* Enhancing water efficiency and wastewater treatment using sustainable technologies: A laboratory and pilot study for adhesive and leather chemicals production. **Journal of Water Process Engineering**, v. 36, p. 1-10, maio 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101308>>.
- [8] OZTURK, E.; CINPERI, N. C. Water efficiency and wastewater reduction in an integrated woolen textile mill. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 686–696, ago. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.021>>.
- [9] GABARDA-MALLORQUÍ, A.; GARCIA, X.; RIBAS, A. Mass tourism and water efficiency in the hotel industry: A case study. **International Journal of**

**Hospitality Management**, v. 61, p. 82–93, nov. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2016.11.006>>.

[10] OLIVEIRA, G. *et al.* Perdas de água 2020 (SNIS 2018): Desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento. **Trata Brasil, Go Associados, Water.org**, v. 2018, p. 1-86, jun. 2020.

[11] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE – INMETRO. Portaria nº 029 de 07 de fevereiro de 1994, p. 1–13.

[12] SILVA, J. Webinarhidrossanitario: hidrômetros individuais - 14/06. Julian Silva. AltoQi. jun. 2018. 1 vídeo (59 min e 12 s). Disponível em: <<https://www.eventials.com/mktoaltoqi/webinar-hidrossanitario-hidrometros-individuais-30-05/>>. Acesso em: 03 dez. 2020.

[13] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE – INMETRO. Portaria nº 246 de 17 de outubro de 2000, p. 1–12.

[14] BRASIL. Lei nº 13.312, de 12 de julho de 2016. Altera a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, para tornar obrigatória a medição individualizada do consumo hídrico nas novas edificações condominiais. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 153, n. 132-A, p. 1-4, 12 jul. 2016. Disponível em: <<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1000&pagina=1&data=12/07/2016>>. Acesso em: 2 abr. 2020..

[15] CATTAPRETA, B. L. *et al.* Sistema de medição individualizada de água: estudo de caso de edifício comercial em São Paulo. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 11, n. 3, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.5216/reec.v11i3.37331>>

[16] CHAIB, E. B. D.; FARIA, D. M. C. P.; NASCIMENTO, N. de O. Avaliação do potencial de redução do consumo de água potável por meio da medição individualizada de água em edifícios residenciais. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABRH, 2017. p. 1-7.

[17] SOUSA, V.; SILVA, C. M.; MEIRELES, I. Performance of water efficiency measures in commercial buildings. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 143, p. 251–259, ago. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.013>>.

[18] RECIFE, PE. Lei nº 16.759, de 17 de abril de 2002. Institui a obrigatoriedade da instalação de hidrômetros individuais nos edifícios. **Diário Oficial da Prefeitura do Recife**: poder executivo, Recife, PE, 8 abr. 2002. Disponível em: <<http://www.recife.pe.gov.br/diariooficial-acervo/exibemateria.php?cedicacodi=203&aedicaano=2002&ccadecodi=2&csecacodi=2&cmatercodi=6&QP=Lei+16759&TP=>>>. Acesso em: 26 nov. 2020.

[19] CURITIBA, PR. Lei nº 10.785, de 18 de setembro de 2003. Cria no Município de Curitiba o Programa de Conservação e Uso Racional da Água nas Edificações - PURAE. **Diário Oficial do Município de Curitiba**: atos do poder executivo, Curitiba, PR, ano 36, n. 72, p. 1-12, 23 set. 2003. Disponível em: <[https://legisladoexterno.curitiba.pr.gov.br/DiarioConsultaExterna\\_Download.aspx?Id=2911](https://legisladoexterno.curitiba.pr.gov.br/DiarioConsultaExterna_Download.aspx?Id=2911)>. Acesso em: 26 nov. 2020.

[20] GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL. Lei nº 3.557, de 18 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a individualização de instalação de hidrômetro nas edificações verticais residenciais e nas de uso misto e nos condomínios residenciais do Distrito Federal, e dá outras providências. **Diário Oficial do Distrito Federal**: seção 1, Brasília, DF, ano 35, n. 14, p. 1-52, 20 jan. 2005. Disponível em: <[http://www.buriti.df.gov.br/ftp/diariooficial/2005/01\\_Janeiro/DODF%20014%2020-01-2005/Se%C3%A7%C3%A3o01-%2014.pdf](http://www.buriti.df.gov.br/ftp/diariooficial/2005/01_Janeiro/DODF%20014%2020-01-2005/Se%C3%A7%C3%A3o01-%2014.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2020.

[21] NITERÓI, RJ. Lei nº 2.340, de 6 de junho de 2006. Estabelece, para projetos de edificações coletivas, a exigência de localização de hidrômetro para medição do consumo de água de cada unidade autônoma. **Diário Oficial da Prefeitura Municipal de Niterói**: atos do prefeito, Niterói, RJ, p. 1-15, 7 jun. 2006. Disponível em: <[http://pgm.niteroi.rj.gov.br/downloads/do/2006/06\\_Jun/07.pdf](http://pgm.niteroi.rj.gov.br/downloads/do/2006/06_Jun/07.pdf)>. Acesso em: 26 nov. 2020.

[22] SALVADOR, BA. Lei nº 7.780, de 22 de dezembro de 2009. Dispõe sobre a instalação de hidrômetros individuais e dá outras providências. **Diário Oficial do Município do Salvador**: atos do poder legislativo, Salvador, BA, ano 23, n. 5037, p. 1-88, 22 dez. 2009. Disponível em: <[http://www.dom.salvador.ba.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1461](http://www.dom.salvador.ba.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1461)>. Acesso em: 26 nov. 2020.

[23] TRÊS RIOS, RJ. Lei nº 4.500, de 25 de maio de 2018. Institui a obrigatoriedade da instalação de hidrômetros e dá outras providências. **Boletim Informativo Oficial do Município de Três Rios**: leis municipais, Três Rios, RJ, ano 45, n. 1509, p. 1-14, 30 maio 2018. Disponível em: <<https://doweb.rio.rj.gov.br/portal/visualizacoes/pdf/4025#/p:3/e:4025?find=lei%20complementar%20198>>. Acesso em: 26 nov. 2020.

[24] RIO DE JANEIRO, RJ. Lei Complementar nº 198, de 14 de janeiro de 2019. Institui o Código de Obras e Edificações Simplificado do Município do Rio de Janeiro - COES. **Diário Oficial do Município do Rio de Janeiro**: leis sancionadas e vetos, Rio de Janeiro, RJ, ano 32, n. 201, p. 1-68, 15 jan. 2019. Disponível em: <<https://doweb.rio.rj.gov.br/portal/visualizacoes/pdf/4025#/p:3/e:4025?find=lei%20complementar%20198>>. Acesso em: 26 nov. 2020.

[25] SANCHEZ, J. G. Dimensionamento de hidrômetros e análise de traço. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABES, 1997. p. 1925-1939.

- [26] XU, Z. *et al.* Towards high resolution monitoring of water flow velocity using flat flexible thin mm-sized resistance-typed sensor film (MRSF). **WaterResearch** **X**, v. 4, p. 1-10, abr. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wroa.2019.100028>>.
- [27] JÚNIOR, M. de O. Instalações prediais de água fria. [s. d.]. Disponível em: <[http://www.viptec.com.br/Arquivos\\_Dicas/6047Modulo%201%20-%20Agua%20fria%20-%20Introducao%20V04.pdf](http://www.viptec.com.br/Arquivos_Dicas/6047Modulo%201%20-%20Agua%20fria%20-%20Introducao%20V04.pdf)>. Acesso em: 25 nov. 2020.
- [28] ORENGO, G. et al. Curvature Characterization of Flex Sensors for Human Posture Recognition. **Universal Journal of Biomedical Engineering**, v. 1, n. 1, p. 10-15, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.13189/ujbe.2013.010103>>.
- [29] SAGGIO, G. et al. Resistive flex sensors: a survey. **Smart Materials and Structures**, v. 25, n. 1, p. 013001, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/1/013001>>.
- [30] SAGGIO, G.; ORENGO, G. Flex sensor characterization against shape and curvature changes. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 273, p. 221-231, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.02.035>>.
- [31] SAGGIO, G. A novel array of flex sensors for a goniometric glove. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 205, p. 119-125, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.10.030>>.
- [32] GUO, Y.; ZHANG, X.; AN, N. Monitoring neck posture with flex sensors. *In: 2019 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY (ICIST), 2019, Hulunbuir, China. 2019 9th international conference on information science and technology (ICIST), 2019.* Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/icist.2019.8836806>>.
- [33] BORGES, L. M. et al. Smart-clothing wireless flex sensor belt network for foetal health monitoring. *In: 3D INTERNATIONAL ICST CONFERENCE ON PERVASIVE COMPUTING TECHNOLOGIES FOR HEALTHCARE, 2009, London, UK. 3d International ICST Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare. 2009.* Disponível em: <<https://doi.org/10.4108/icst.pervasivehealth2009.6028>>.
- [34] JABIN, J. et al. Low cost 3D printed prosthetic for congenital amputation using flex sensor. *In: 2019 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ELECTRICAL ENGINEERING (ICAEE), 2019, Dhaka, Bangladesh. 2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 2019.* Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/icaee48663.2019.8975415>>.
- [35] HU, Q.; TANG, X.; TANG, W. A smart chair sitting posture recognition system using flex sensors and FPGA implemented artificial neural network. **IEEE Sensors Journal**, v. 20, n. 14, p. 8007-8016, 15 jul. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/jsen.2020.2980207>>.

[36] STARCK, J. R. et al. An inexpensive sensor for measuring surface geometry. **Medical Engineering & Physics**, v. 21, n. 10, p. 725-729, 1999. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s1350-4533\(99\)00097-1](https://doi.org/10.1016/s1350-4533(99)00097-1)>.

[37] YAO, C. et al. Design and verification of a wireless sensing system for monitoring large-range ground movement. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 303, p. 111745, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111745>>.

[38] RAMESH, M. V.; VIDYA, P. T.; PRADEEP, P. Context aware wireless sensor system integrated with participatory sensing for real time road accident detection. *In*: 2013 TENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS AND OPTICAL COMMUNICATIONS NETWORKS - (WOCN), 2013, Bhopal, India. **2013 Tenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks - (WOCN)**, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/wocn.2013.6616203>>.

[39] FAN, Y. et al. High resolution air flow velocity monitoring using air flow resistance-type sensor film (AFRSF). **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 297, p. 111562, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111562>>.

[40] SRINIVASAN, C. R. et al. Measurement of flow using bend sensor. *In*: 2014 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ENERGY CONVERSION TECHNOLOGIES (ICAECT), 2014, MANIPAL, India. **2014 International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT)**, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/icaect.2014.6757056>>.

[41] STEWART, R. L.; FOX, J. F.; HARNETT, C. K. Time-Average velocity and turbulence measurement using wireless bend sensors in an open channel with a rough bed. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 7, p. 696-706, 2013. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000725](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000725)>.

[42] GERE, J. M. **Mecânica dos materiais**. 7 .ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

[43] Overview of materials for Polyester Film MatWeb: Material Property Data. Disponível em:

<<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=40559706b4fd4aa0a43f5739799728f5&ckck=1>>. Acesso em: 2 fev. 2021.

[44] Campilho, A. **Instrumentação electrónica: métodos e técnicas de medição**, Edições FEUP, 2000.

[45] MCCULLOCH, W.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **Bulletin of Mathematical Biology**, v. 52, n. 1-2, p. 99-115, 1990. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s0092-8240\(05\)80006-0](https://doi.org/10.1016/s0092-8240(05)80006-0)>.

[46] Haykin, S. **Redes neurais: princípios e prática**. Bookman, 2001, 898p.

- [47] JAWAD, J; HAWARI, A. H.; JAVAID ZAIDI, S. Artificial neural network modeling of wastewater treatment and desalination using membrane processes: a review. **Chemical Engineering Journal**, v. 419, p. 129540, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129540>>.
- [48] TAKI, M. et al. Heat transfer and MLP neural network models to predict inside environment variables and energy lost in a semi-solar greenhouse. **Energy and Buildings**, v. 110, p. 314-329, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.010>>.
- [49] GHRITLAHRE, H. K.; PRASAD, R. K. Prediction of thermal performance of unidirectional flow porous bed solar air heater with optimal training function using artificial neural network. **Energy Procedia**, v. 109, p. 369-376, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.033>>.
- [50] CETINER, C. et al. Generating hot water by solar energy and application of neural network. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, n. 8-9, p. 1337-1348, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.09.004>>.
- [51] BALA, B. K. et al. Experimental and neural network prediction of the performance of a solar tunnel drier for drying jackfruit bulbs and leather. **Journal of Food Process Engineering**, v. 28, n. 6, p. 552-566, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2005.00042.x>>.
- [52] Saxena N., Varshney D. Smart home security solutions using facial authentication and speaker recognition through artificial neural networks. **International Journal of Cognitive Computing in Engineering**. v. 2, p. 154-164, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2021.10.001>>.
- [53] REDDY, K. R. L.; BABU, G. R.; KISHORE, L Face recognition based on eigen features of multi scaled face components and an artificial neural network. **Procedia Computer Science**, v. 2, p. 62-74, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2010.11.009>>.
- [54] KUMAR., A. Comparative analysis of RBF (radial basis function) network and gaussian function in multi-layer feed-forward neural network (MLFFNN) for the case of face recognition. **International Journal of Advanced Research**, v. 5, n. 10, p. 843-873, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.21474/ijar01/5597>>.
- [55] ASSIS, R.K.M. Uso de Redes Neurais Artificiais para o desenvolvimento de modelos de previsão da condição de pavimentos de aeroportos. *In: 7º CONGRESSO LUSO BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL*. 2016, Maceió. **Anais...** Maceió: PLURIS, 2016.
- [56] BISOI, R.; DASH, P. K. A hybrid evolutionary dynamic neural network for stock market trend analysis and prediction using unscented Kalman filter. **Applied Soft Computing**, v. 19, p. 41-56, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.01.039>>.

- [57] HU, H. *et al.* Predicting the direction of stock markets using optimized neural networks with Google Trends. **Neurocomputing**, v. 285, p. 188-195, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.01.038>>.
- [58] MOGHAR, A.; HAMICHE, M. Stock market prediction using LSTM recurrent neural network. **Procedia Computer Science**, v. 170, p. 1168-1173, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.049>>. 5:843–873>.
- [59] Chhajjer P, Shah M, Kshirsagar A. The applications of artificial neural networks, support vector machines, and long–short term memory for stock market prediction. **Decision Analytics Journal**, v. 2, p. 100015, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.dajour.2021.100015>>.
- [60] WANG, W. *et al.* Experimental study on water pipeline leak using In-Pipe acoustic signal analysis and artificial neural network prediction. **Measurement**, v. 186, p. 110094, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110094>>.
- [61] PÉREZ-PÉREZ, E. J. *et al.* Leak diagnosis in pipelines using a combined artificial neural network approach. **Control Engineering Practice**, v. 107, p. 104677, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104677>>.
- [62] ISMAEL, M. *et al.* Assessing drinking water quality based on physical, chemical and microbial parameters in the Red Sea State, Sudan using a combination of water quality index and artificial neural network model. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 14, p. 100612, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100612>>.
- [63] NAYAK, J. G.; PATIL, L. G.; PATKI, V. K. Artificial neural network based water quality index (WQI) for river Godavari (India). **Materials Today: Proceedings**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.100>>.
- [64] ZHENG, X.; NGUYEN, H. A novel artificial intelligent model for predicting water treatment efficiency of various biochar systems based on artificial neural network and queuing search algorithm. **Chemosphere**, v. 287, p. 132251, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132251>>.
- [65] ZANINI, A. Regulação econômica no setor elétrico brasileiro: uma metodologia para definição de fronteiras de eficiência e cálculo do fator x para empresas distribuidoras de energia elétrica. Rio de Janeiro, 204. 142p. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [66] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5626 - Instalação predial de água fria Rio de Janeiro, p. 1-41, 1998.

[67] Sroog, C. E. Polyimides. **Progress in Polymer Science**. v. 16, n. 4, p. 561-694, 1997. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0079-6700\(91\)90010-I](https://doi.org/10.1016/0079-6700(91)90010-I)>.

[68] LIAW, D. *et al.* Advanced polyimide materials: syntheses, physical properties and applications. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 7, p. 907-974. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.02.005>>.

## Apêndice A – Código Rede Neural Artificial do Matlab

```
V = dados(:,1);           % lê os dados de tensão
Q = dados(:,2);           % lê os dados da vazão desejada

net = newrbe(V', Q');     % cria e automaticamente treina a
                           rede

Qinv = net(V')';         % roda a rede com os dados de
                           entrada (depois da rede treinada,
                           basta passar o novo valor de
                           tensão)

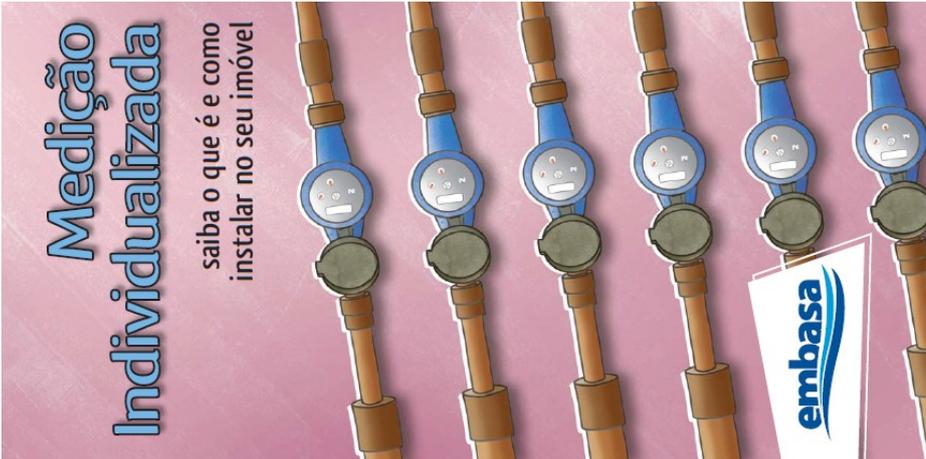
figure()
plot(V, Q, V, Qinv, 'x', 'LineWidth', 2)      % plota os dados de
treinamento e os dados de teste

xlabel ("Tensão (V)")
ylabel ("Vazão (m³/h)")
legend({'LTSpice', 'Rede Neural
Artificial'}, 'Location', 'northwest', 'NumColumns', 1)

axis([0 4.5 0 3])

a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 11, 'FontWeight', 'bold')
grid on
```

## Anexo A – Folder Medição Individualizada (EMBASA)



# Medição Individualizada

saiba o que é e como instalar no seu imóvel

**Fique atento**  
A responsabilidade da Embasa em relação às instalações e manutenção estende-se até o ponto de entrega de água e coleta de esgoto, de acordo com a legislação vigente. Dessa forma, o usuário é responsável por todas as instalações de água após o ponto de entrega e instalações de esgoto antes do ponto de coleta, bem como sua conservação, podendo a Embasa inspecioná-las quando achar conveniente.  
No município de Salvador, a lei municipal nº 7.780/2009 determina que os novos empreendimentos apresentem, na sua planta hidráulica, a previsão para futura instalação de hidrômetros individuais para medição do consumo em cada unidade.  
O condomínio pode optar por fazer a sua própria emissão de valores individuais ou contratar com a Embasa tal serviço, sem custo adicional.  
O custo do projeto hidráulico, obras, aquisição, operação e manutenção dos equipamentos e acessórios, necessários ao sistema de medição individualizada, é de responsabilidade das empresas construtoras e/ou condôminos.

**embasa**  
0800 0555 195  
[www.embasa.ba.gov.br](http://www.embasa.ba.gov.br)

**Orientações gerais**  
Para emissão das contas individualizadas pela Embasa, as empresas construtoras deverão observar as seguintes orientações:

Os hidrômetros individuais e concentradores, quando utilizados, deverão ser devidamente identificados com o número de porta correspondente e instalados em caixa de proteção.

Os hidrômetros individuais e concentradores, quando utilizados, devem ser instalados em locais de fácil acesso, que permitam sua leitura e manutenção, não podendo, portanto, ser instalados dentro das unidades consumidoras.

Os equipamentos deverão ser certificados pelo Inmetro, aprovados pela Embasa e atender às normas técnicas brasileiras.

É responsabilidade do condomínio contratar uma empresa ou profissional de engenharia civil para fazer os projetos, o orçamento e as obras de modificações físicas.

**IMPORTANTE**  
A Embasa não analisa projetos e não se responsabiliza por problemas nas instalações hidráulicas internas nos prédios e condomínios.



## Anexo B – Ficha Técnica da Torneira Docol



### FICHA TÉCNICA

#### Misturador Monocomando para Cozinha de Mesa Mangiare

00506306

#### DESCRIÇÃO

Torneira com entrada vertical para instalação em mesa e acionamento manual.



#### TECNOLOGIAS E CARACTERÍSTICAS



Bica Móvel



2 Jatos



Cromado biniquel



Durabilidade

#### VANTAGENS

A linha Mangiare possui design exclusivo em duas opções de acabamento: cromado e níquel escovado;

Seus produtos permitem o ajuste de temperatura e intensidade do jato com apenas uma mão, de maneira simples, prática e intuitiva, utilizando uma única alavanca;

Os misturadores possuem ducha manual pull-down com mangueira flexível que se projeta até 45 cm, proporcionando maior flexibilidade e praticidade no uso do produto, que é ideal para ambientes gourmet;

Além disso, apresentam maior versatilidade com botão de acionamento com duas opções de jato: jato arejado, para maior economia de água; e jato ducha para maior pressão e facilidade na limpeza de alimentos e louças;

A bica giratória com rotação de 180° possibilita que o produto seja utilizado em pia de duas cubas;

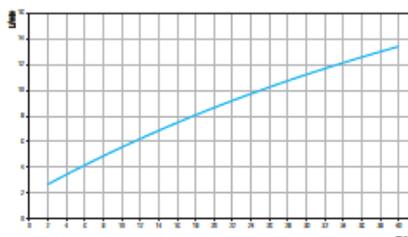
Acabamento cromado biniquel de alta resistência à corrosão, conservando a beleza do produto por muito mais tempo;

Acompanha dois flexíveis de ligação de 60 cm.

#### GARANTIA

Garantia Toda Vida: qualidade e segurança por tempo indeterminado.

#### CURVA DE VAZÃO



#### ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

CLASSE DE PRESSÃO	5 a 40 m.c.a
BITOLA	1/2" (DN15)
COMPOSIÇÃO	Liga de Cobre, Plástico Engenharia, Zamac, Aço Inoxidável
TEMPERATURA MÁXIMA	70°C
COMPLEMENTOS	Acompanha Registro Regulador de Vazão (RRV).
NORMAS DE REFERÊNCIA	NBR 15267

## Anexo C – Ficha Técnica do Chuveiro Tradicional Docol

docol

FICHA TÉCNICA

### Chuveiro tradicional

Cod. 12120506 - Cromado

#### DESCRIÇÃO

O chuveiro de teto dessa linha é perfeito para quem busca o melhor momento com a água, o seu momento de relaxamento no dia a dia. Com a disposição ideal de crivos, que são os responsáveis pela saída regular da água, o jato é forte, relaxante e revigorante ao mesmo tempo. Esse chuveiro pode ser instalado tanto em casas ou apartamentos, independente da pressão da água.



#### TECNOLOGIAS E CARACTERÍSTICAS



Cromado  
biniquel



Alta  
durabilidade



Garantia  
Toda Vida

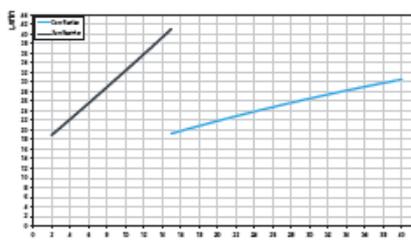
#### VANTAGENS

**Cabeça articulável:** Permite direcionar o jato d'água para um banho ainda mais prazeroso.

**Funcionamento perfeito em alta e baixa pressão:** todos os chuveiros têm funcionamento perfeito tanto em baixa quanto em alta pressão, para proporcionar a melhor experiência de banho.

**Acabamento cromado biniquel** que proporciona alta durabilidade e maior resistência à corrosão, conservando a beleza e o brilho dos produtos por muito mais tempo.

#### CURVA DE VAZÃO



#### GARANTIA TODA VIDA

Qualidade e segurança por tempo indeterminado. Para mais informações, acesse <https://www.docol.com.br/pt/garantia>

#### ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

BITOLA	1/2" - DN 15
CLASSE DE PRESSÃO	2 a 40 m.c.a
TEMPERATURA MÁXIMA DA ÁGUA	70°C
NORMA	NBR 15206
CONTEÚDO DA EMBALAGEM	1 chuveiro, 1 canopia e 1 manual de instalação
COMPOSIÇÃO	Ligas de cobre, elastômeros e plástico de engenharia
TIPO DE INSTALAÇÃO	Parede

docol.com.br

## Anexo D – Artigo Congresso Brasileiro de Metrologia 2021



### Proposition of water meter for buildings based on a thin-film resistive sensor: electromechanical and thermal characterizations

L S Gonçalves <sup>1,3</sup>, K A R Medeiros <sup>2</sup> and C R H Barbosa <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Postgraduate Program in Metrology, Rio de Janeiro, Brazil

<sup>2</sup> Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Mechanical Engineering Department, Optical Fiber Sensors Laboratory, Rio de Janeiro, Brazil

<sup>3</sup> Corresponding author: [laisgoncalves@aluno.puc-rio.br](mailto:laisgoncalves@aluno.puc-rio.br)

**Abstract.** Notoriously, measurement proves to be essential to encourage water conservation. Thus, this work characterizes two thin-film resistive sensors (bend sensors) with different coatings aiming at their application to measure water consumption. For this, the individual water measurement system is presented and discussed briefly. Then, resistive sensor parameters and operating principles are detailed, as well as the mathematical formulation of the correlation of the sensor resistance with the flow velocity. Methodologically, the system developed for the electromechanical and thermal characterization of the sensor is presented. The results allowed obtaining a quadratic relationship between the sensor deflection angle and the resistance. Furthermore, it was observed that the polyester-coated sensor presented a low hysteresis value when subjected to temperature variation, obtaining a negative linear relationship between the sensor resistance and temperature. In turn, the polyimide-coated sensor did not show low hysteresis when exposed to temperature change and flexed at 50° and 70° angles. Finally, it is proposed for future work computer simulations and experimental tests to confirm the applicability of the sensor for water measurement.

#### 1. Introduction

As a consequence of economic progress, population growth, and changes in consumption patterns, the use of freshwater has increased significantly in the last 100 years. This increase was six fold over this period and continues to increase – according to the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), water consumption is expected to grow by approximately 25 % by 2030. In addition, other worrying aspects are the exponential drop in water quality and water stress, which affects more than 2 billion people when basically estimated by availability as a function of supply [1].

The so-called economic water scarcity means that water is physically available, but the infrastructure for accessing it is precarious, and many regions of the world are facing this situation. This precariousness is due to deficient regulation, lack of incentives, and/or lack of investment in the water sector [1]. However, some economic studies have found that, when investing US\$ 1 in public hydrological monitoring systems, on average, US\$ 4 is generated in social benefits [2], highlighting the socioeconomic value and the need for more studies focused on the technological advancement in the water sector.

Notoriously, metering is one of the most effective procedures for encouraging water conservation. However, in some countries – such as Brazil – water only begins to be valued and rationed when other

## Anexo E – Artigo XXIII IMEKO World Congress

Measurement: Sensors 18 (2021) 100093



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Measurement: Sensors

journal homepage: [www.sciencedirect.com/journal/measurement-sensors](https://www.sciencedirect.com/journal/measurement-sensors)



### Electromechanical characterization of resistive sensor for application in water metering

#### ARTICLE INFO

##### Keywords

Water consumption  
Volume measurement  
Resistive sensor  
Resistance  
Simulation  
Velocity

#### ABSTRACT

The bend sensor is a resistive sensor that, due to its material properties, changes its electrical resistance as it is bent. In general, one of its most notable characteristics is its ample versatility. In this sense, this work characterizes, experimentally and by simulation, a sensor of this type to study the feasibility of its use for measuring the volume of water drained through a pipe. Therefore, some basic principles are shown to establish the correlation between the sensor resistance and flow velocity, and a methodology to characterize the bend sensor is described. Also, a comparison between the results obtained from this experimental characterization with a computer simulation is presented. The results indicate that the bend sensor can be a viable option to integrate a water volume meter. Finally, future work is proposed to implement the bend sensor in a hydraulic testing section to confirm its potential through experiments.

Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100093>