

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DA MEDIÇÃO POR  
TELEMETRIA EM REDES DE ÁGUA: ESTUDO,  
MODELAGEM DO CONSUMO E CONTROLE DE PERDAS**

**DIOGO FIDELIS COSTA**

**ORIENTADOR: ALEXANDRE KEPLER SOARES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E  
RECURSOS HÍDRICOS**

**BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2022**  
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGEHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DA MEDIÇÃO POR TELEMETRIA  
EM REDES DE ÁGUA: ESTUDO, MODELAGEM DO CONSUMO E  
CONTROLE DE PERDAS**

**DIOGO FIDELIS COSTA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU  
DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS  
HÍDRICOS.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Alexandre Kepler Soares, PhD (ENC-UnB)**  
**(Orientador)**

---

**Prof. Sergio Koide, PhD (Examinador Interno)**

---

**Prof. Peter Batista Cheung, PhD (Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 25 DE FEVEREIRO DE 2022**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

COSTA, DIOGO FIDELIS

Avaliação dos Benefícios da Medição por Telemetria em Redes de Água: Estudo, Modelagem do Consumo e Controle de Perdas [Distrito Federal] 2022.

xvii, 152p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2022).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Telemetria

2. Medição Remota

3. Consumo

4. Distribuição de Água

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

COSTA, D. F. (2022). Avaliação dos Benefícios da Medição por Telemetria em Redes de Água: Estudo, Modelagem do Consumo e Controle de Perdas. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-242/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 152p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Diogo Fidelis Costa

TÍTULO: Avaliação dos Benefícios da Medição por Telemetria em Redes de Água: Estudo, Modelagem do Consumo e Controle de Perdas.

GRAU: Mestre

ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Diogo Fidelis Costa

QI 27, Lote 07/09, Bloco A, Apartamento 210.

71.060-277 Brasília – DF – Brasil.

## RESUMO

### **AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DA MEDIÇÃO POR TELEMETRIA EM REDES DE ÁGUA: ESTUDO, MODELAGEM DO CONSUMO E CONTROLE DE PERDAS.**

A modelagem de sistemas de distribuição de água é assunto de inúmeros trabalhos científicos que visam aproximar os valores observados com auxílio de equipamentos de medição de pressão e vazão àqueles calculados a partir de modelos hidráulicos desenvolvidos. A evolução da modelagem de redes de distribuição de água tem início com utilização de modelos experimentais e cálculos manuais, passando pela utilização de *softwares* com essa finalidade e chegando a modelos que envolvem o aperfeiçoamento da linguagem de programação dos *softwares* utilizando técnicas de otimização.

Neste contexto, a medição inteligente do consumo de água é capaz de fornecer dados de consumo em uma resolução espacial e temporal mais específica, isto é: em nível de consumidor individual e em pequenos intervalos de tempo, possibilitando a utilização de ferramentas de análise de dados para caracterizações mais precisas dos perfis de consumo e a construção de modelos para detecção de vazamentos, aprimorando a gestão da demanda.

O presente trabalho teve seu foco na Quadra 12 do Setor Habitacional Jardins Mangueiral - SHJM - na Região Administrativa de São Sebastião/DF, sendo meta avaliar os benefícios do sistema de medição por telemetria implantado no projeto piloto da individualização de hidrômetros, propondo estudo, modelagem e ferramentas de gestão dos dados de consumo obtidos.

Para tanto, foi realizada a avaliação qualitativa e quantitativa dos benefícios da implantação do sistema de leitura remota, considerando dois cenários, um que envolvia apenas sua implantação e outro envolvendo o desenvolvimento de outros requisitos apontados pela bibliografia. Também foi feita a modelagem do consumo de água para uma amostra de hidrômetros das unidades do condomínio com base em três tipos de modelo: ARIMA, SARIMA e Regressão Linear Multivariada. Ainda, foi constituído o Distrito de Medição e Controle (DMC) temporário, possibilitando a determinação do balanço hídrico para rede de distribuição, que resultou na avaliação das perdas reais e aparente. Finalmente, utilizando o método de Comparação entre Padrões de Distribuição de Vazão (CFPD) e médias móveis, foi elaborado sistema, que se mostrou usual, de alarme de vazamentos internos e de funcionamento dos medidores para as unidades individuais amostradas.

## **ABSTRACT**

### **EVALUATION OF THE SMART METERING BENEFITS IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS: STUDY, WATER CONSUMPTION MODELING, AND WATER LOSS CONTROL.**

Modeling water distribution systems is the subject of numerous scientific works that aim to approximate the values observed with the aid of pressure and flow measurement equipment to those calculated from hydraulic models. The evolution of water distribution models begins with the use of experimental models and manual calculations, passing by using software and resulting in models which involve improving the software's programming language using optimization techniques.

In this context, smart metering can provide consumption data in a more specific spatial and temporal resolution, that is, at the individual consumer level and in smaller time intervals, enabling the use of data analysis tools for more accurate characterizations of consumption profiles and the construction of models for leak detections, improving demand management.

The present work focused on Quadra 12 of the Jardins Mangueiral Housing Sector (SHJM) in the Administrative Region of São Sebastião, in the Federal District, to evaluate the benefits of the smart metering system implemented in the pilot project of the individualization of water meters, proposing a study, modeling, and management tools for the consumption data obtained.

Therefore, a qualitative and quantitative evaluation of the benefits of implementing the remote metering system was carried out, the evaluations considered two scenarios, one involving only its implementation and the other involving the development of other requirements indicated by the bibliography. Water consumption was also modeled for a sample of water meters in the condominium units based on three types of models: ARIMA, SARIMA, and Multivariate Linear Regression. Likewise, a temporary Measurement and Control District (DMC) was created, enabling the determination of the water balance for the studied distribution network, which resulted in the assessment of real and apparent losses. Finally, using the Comparison of Flow Pattern Distribution (CFPD) method and moving averages, a system for internal leakage and meter operation alarm, which proved to be usual, was developed.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
2. OBJETIVOS .....	18
2.1 OBJETIVO GERAL.....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO DA LITERATURA .....	19
3.1 CONSUMO RESIDENCIAL DE ÁGUA POTÁVEL .....	19
3.1.1 Modelagem do Consumo Residencial de Água Potável .....	21
3.1.2 Avaliação do Erro em Modelos de Previsão.....	26
3.2 PERDAS DE ÁGUA .....	28
3.2.1 Balanço Hídrico .....	30
3.2.2 Perdas Reais .....	32
3.2.3 Perdas Aparentes.....	38
3.2.4 Indicadores de Perdas .....	39
3.2.5 Distritos de Medição e Controle .....	41
3.3 MEDIÇÃO DE ÁGUA E TELEMETRIA.....	43
3.3.1 Micromedição e Hidrômetros.....	44
3.3.2 Individualização da Medição de Água.....	47
3.3.3 Medidores de Vazão .....	49
3.3.4 Componentes do Sistema de Medição Remota .....	51
3.3.5 Sistemas SCADA .....	54
3.3.6 Internet das Coisas e Medição Inteligente.....	54
3.3.7 Benefícios da Medição Inteligente.....	55
4. METODOLOGIA .....	61
4.1 ÁREA DE ESTUDO .....	62
4.1.1 Configuração Hidráulica da Rede de Distribuição da Área de Estudo..	64
4.1.2 Configuração do Sistema de Telemetria da Área de Estudo .....	69
4.1.3 Instalação de Medidor de Vazão .....	71
4.2 ESTUDO DOS BENEFÍCIOS DA TELEMETRIA .....	73
4.2.1 Benefícios da Telemetria Desconsiderando os Impactos do Trabalho ...	73
4.2.2 Benefícios da Telemetria Considerando os Impactos do Trabalho .....	74
4.3 COLETA DE DADOS .....	76
4.3.1 Dados da Medição de Vazão .....	76
4.3.2 Dados de Telemetria .....	77
4.3.3 Séries Temporais de Consumo .....	79
4.4 MODELAGEM DO CONSUMO DE ÁGUA.....	79
4.4.1 Modelo ARIMA .....	80
4.4.2 Modelo SARIMA .....	80
4.4.3 Regressão Linear Multivariada.....	81
4.5 BALANÇO HÍDRICO DA ÁREA DE ESTUDO .....	82
4.5.1 Determinação do Consumo do Condomínio .....	83

4.5.2	Estimativa das Perdas Reais.....	84
4.5.3	Estimativa dos Indicadores de Perda .....	86
4.6	<b>SISTEMA DE ALARME DE VAZAMENTOS E FALHAS NA MEDIÇÃO</b>	<b>87</b>
4.6.1	Evolução do Consumo e Média Móvel.....	87
4.6.2	Comparação dos Consumos em Períodos Diferentes .....	88
4.6.3	Indicador de Consumo .....	88
5.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>89</b>
5.1	<b>ESTUDO DOS BENEFÍCIOS DA TELEMETRIA .....</b>	<b>89</b>
5.1.1	Benefícios da Telemetria Desconsiderando Impactos do Trabalho – Cenário 01 .....	89
5.1.2	Benefícios da Telemetria Considerando Impactos do Trabalho – Cenário 02 .....	93
5.2	<b>DADOS COLETADOS .....</b>	<b>98</b>
5.2.1	Dados da Medição de Vazão .....	98
5.2.2	Dados de Telemetria.....	100
5.2.3	Séries Temporais de Consumo .....	107
5.3	<b>MODELAGEM DO CONSUMO DE ÁGUA.....</b>	<b>110</b>
5.3.1	Modelo ARIMA .....	111
5.3.2	Modelo SARIMA .....	113
5.3.3	Regressão Linear Multivariada.....	115
5.4	<b>BALANÇO HÍDRICO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>124</b>
5.4.1	Determinação do Consumo do Condomínio .....	124
5.4.2	Estimativa de Perdas Reais.....	126
5.4.3	Estimativa dos Indicadores de Perda .....	129
5.5	<b>SISTEMA DE ALARME DE VAZAMENTOS E FALHAS NA MEDIÇÃO</b> .....	<b>130</b>
6.	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>133</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>137</b>
	<b>APÊNDICE A – DETALHAMENTO DOS CUSTOS PROPORCIONAIS DOS</b> <b>BENEFÍCIOS .....</b>	<b>144</b>
	<b>APÊNDICE B – CÓDIGOS UTILIZADOS (RStudio) .....</b>	<b>145</b>
	<b>APÊNDICE C – BASES DE DADOS .....</b>	<b>149</b>

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 01.3 – Interpretação dos resultados do CFPD.
- Tabela 02.3 – Classificação de hidrômetros quanto ao princípio de funcionamento;
- Tabela 03.3 – Classificação de hidrômetros quanto à classe metrológica;
- Tabela 04.3 – Erros admissíveis em hidrômetros;
- Tabela 05.3 – Requisitos para atingir os benefícios da medição automatizada;
- Tabela 06.3 – Possíveis benefícios para as concessionárias de água;
- Tabela 07.3 – Possíveis benefícios para os usuários de água;
- Tabela 08.3 – Possíveis benefícios compartilhados(concessionárias/usuários);
- Tabela 09.4 – Serviços e produtos do Contrato de implementação da telemetria;
- Tabela 10.4 – Frequência de transmissão dos dados de telemetria;
- Tabela 11.4 - Consumo diário de uma unidade habitacional do condomínio (dia 30/10/2020);
- Tabela 12.4 – Modelo do banco de dados para regressão linear multivariada;
- Tabela 13.4 – Modelo do banco de dados para consumo diário dos hidrômetros individuais;
- Tabela 14.4 – Critérios de classificação do indicador;
- Tabela 15.5 – Benefícios da telemetria desconsiderando o trabalho (cenário 01);
- Tabela 16.5 – Impacto percentual dos benefícios (cenário 01);
- Tabela 17.5 – Proporção dos benefícios em relação ao custo operacional (cenário 01);
- Tabela 18.5 – Resumo de resultados da SMC (cenário 01);
- Tabela 19.5 – Benefícios da telemetria considerando o trabalho (cenário 02);
- Tabela 20.5 – Impacto percentual dos benefícios (cenário 02);
- Tabela 21.5 – Proporção dos benefícios em relação ao custo operacional (cenário 02);
- Tabela 22.5 – Resumo de resultados da SMC (cenário 02);
- Tabela 23.5 – Resumo dos dados de medição de vazão;
- Tabela 24.5 – Quadro resumo de leituras;
- Tabela 25.5 – Extrato da série temporal – Apartamento 01;
- Tabela 26.5 – Resultados da modelagem ARIMA;
- Tabela 27.5 – Resultados da modelagem SARIMA;
- Tabela 28.5 – Resumo de variáveis independentes do modelo de Regressão Linear Multivariada;
- Tabela 29.5 – Resumo dos resultados dos Modelos de Regressão Linear Multivariada;
- Tabela 30.5 – Consumo do condomínio no período de estudo;

Tabela 31.5 – Parâmetros e resultados do sistema não linear, proposto por Mazzolani (2016);

Tabela 32.5 – Resultados da estimativa pelas Vazões Mínimas Noturnas;

Tabela 33.5 – Indicadores de Perdas;

Tabela 34.5 – Resultados obtidos: quantidade de eventos por unidade.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 01.3 – Fatores que influenciam o consumo de água potável;
- Figura 02.3 – Fluxograma de um programa de controle de perdas;
- Figura 03.3 – Matriz do balanço hídrico;
- Figura 04.3 – Aplicação do CFPD para dois dias de consumo;
- Figura 05.3 – Análise de blocos – CFPD;
- Figura 06.3 – Setorização na Região Administrativa de Sobradinho/Brasília-DF;
- Figura 07.3 – Tipos de medidores de vazão;
- Figura 08.3 - Sistema de leitura remota para apuração do consumo de água;
- Figura 09.3 – Diagrama de resumo dos possíveis benefícios da medição automatizada;
- Figura 10.4 - Condomínio Jardim das Mangabeiras (SHJM Quadra 12);
- Figura 11.4 – Esquema de distribuição de água da área de estudo;
- Figura 12.4 – Tubulações de alimentação do reservatório do condomínio;
- Figura 13.4 – Reservatório do condomínio (Castelo D’água) e tubulações a ele vinculadas;
- Figura 14.4 – Outro detalhe do reservatório do condomínio (Castelo D’água) e tubulações a ele vinculadas;
- Figura 15.4 – Exemplo de hidrômetro individualizado da área de estudo;
- Figura 16.4 – Hidrômetro geral (macromedidor) da área de estudo;
- Figura 17.4 – Esquema de montagem dos hidrômetros das unidades/área comum;
- Figura 18.4 – Tela “Histórico de medição” do sistema de monitoramento WEB;
- Figura 19.4 - Esquema de telemetria - Condomínio Jardim das Mangabeiras;
- Figura 20.4 – Medidor de vazão utilizado;
- Figura 21.4 – Detalhe de instalação do medidor de vazão (sensores);
- Figura 22.4 – Medidor + *data logges* + computador portátil, instalados na casa de bombas;
- Figura 23.5 – Benefícios da telemetria desconsiderando o trabalho (cenário 01);
- Figura 24.5 – Distribuição das frequências do percentual de impacto dos benefícios (cenário 01);
- Figura 25.5 – Distribuição das frequências da redução do custo operacional do cenário 01 (SMC);
- Figura 26.5 – Benefícios da telemetria considerando o trabalho (cenário 02);
- Figura 27.5 – Distribuição das frequências do percentual de impacto dos benefícios (cenário 02);

Figura 28.5 – Distribuição das frequências da redução do custo operacional do cenário 02 (SMC);

Figura 29.5 – Variação da vazão de entrada na área de estudo;

Figura 30.5 – Variação do volume de entrada na área de estudo;

Figura 31.5 – Comparação entre volume apurado pelo macromedidor e pelo medidor de vazão;

Figura 32.5 – Média de consumo em cada hora – Apartamentos;

Figura 33.5 – Média de consumo em cada hora por dia – Apartamentos;

Figura 34.5 – Média de consumo em cada hora – Casas de dois dormitórios;

Figura 35.5 – Média de consumo em cada hora por dia - Casas de dois dormitórios;

Figura 36.5 – Média de consumo em cada hora – Casas de três dormitórios;

Figura 37.5 – Média de consumo em cada hora por dia - Casas de três dormitórios;

Figura 38.5 – Média de consumo em cada hora – Áreas comuns;

Figura 39.5 – Média de consumo em cada hora por dia - Áreas comuns;

Figura 40.5 – Média de consumo horária (01h00min as 20h00min) – Macromedidor (Hid. Geral);

Figura 41.5 – Média de consumo horária (01h00min as 20h00min) por dia – Macromedidor (Hid. Geral);

Figura 42.5 – Séries Temporais de Consumo – Apartamentos e Casas Tipo A (2 dormitórios);

Figura 43.5 – Séries Temporais de Consumo – Casas Tipo B (3 dormitórios) e Áreas Comuns;

Figura 44.5 – Ajuste do Modelo ARIMA – Ajuste do Modelo SARIMA – Exemplo Casa B2 – Série Treino e Previsão;

Figura 45.5 – Ajuste do Modelo ARIMA – Exemplo Casa B2 – Detalhe do Período de Previsão;

Figura 46.5 – Ajuste do Modelo SARIMA – Exemplo Casa B2 – Série Treino e Previsão;

Figura 47.5 – Ajuste do Modelo SARIMA – Exemplo Casa B2 – Detalhe do Período de Previsão;

Figura 48.5 – Gráficos de pareamento – Apartamento 01;

Figura 49.5 – Gráficos de pareamento – Apartamento 02;

Figura 50.5 – Gráficos de pareamento – Apartamento 03;

Figura 51.5 – Gráficos de pareamento – Apartamento 04;

Figura 52.5 – Gráficos de pareamento – Casa A 01;

Figura 53.5 – Gráficos de pareamento – Casa A 02;  
Figura 54.5 – Gráficos de pareamento – Casa B 01;  
Figura 55.5 – Gráficos de pareamento – Casa B 02;  
Figura 56.5 – Gráficos de pareamento – Casa B 03;  
Figura 57.5 – Gráficos de pareamento – Casa B 04;  
Figura 58.5 – Gráficos de pareamento – Portaria;  
Figura 59.5 – Gráficos de pareamento – Churrasqueira;  
Figura 60.5 – Evolução do Consumo do Condomínio (28/11/2020 a 01/12/2020);  
Figura 61.5 – Pressões nos nós (consumo máximo);  
Figura 62.5 – Pressões nos nós (consumo mínimo);  
Figura 63.5 – Balanço Hídrico do Condomínio (DMC temporário);  
Figura 64.5 – Sistema de Alarme de Vazamentos – Unidades Agrupadas;  
Figura 65.5 – Sistema de Alarme de Vazamentos – Casa B 02.

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ADASA	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
AI	Inteligência Artificial
AICC	Critério de Informação de <i>Akaike</i>
AR	Autorregressão
ARIMA	Modelo Auto-regressivo Integrado de Médias Móveis
ARMA	Média Móvel Autorregressiva
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CFPD	Comparação entre Padrões de Distribuição de Vazão
DF	Distrito Federal
DMC	Distrito de Medição e Controle
GPRS	Serviços Gerais de Pacote por Rádio
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IoT	Internet das Coisas
IWA	Associação Internacional da Água
IRAR	Instituto Regulador de Águas e Resíduos de Portugal
LPWA	Conexão sem Fio de Baixa Potência e Área Ampla
MA	Médias Móveis
MAPE	Erro Percentual Absoluto Médio
MCS	Simulação de Monte Carlo
MNF	Mínima Vazão Noturna
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PNSB	Política Nacional de Saneamento Básico
PVC	Policloreto de Vinila
RRMSE	Raiz Quadrada do Erro Médio Relativo
RTM	Regulamento Técnico Metrológico
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SHJM	Setor Habitacional Jardins Mangueiral
SNIS	Sistema Nacional de Indicadores sobre Saneamento
SARIMA	Modelo Sazonal Auto-regressivo Integrado de Médias Móveis



## 1. INTRODUÇÃO

É fundamento da Política Nacional de Recursos Hídricos - PNRH - que a gestão dos Recursos Hídricos deve ser compartilhada entre Poder Público, usuários e comunidades. A Política tem como objetivo, entre outros, assegurar a utilização sustentável dos recursos hídricos afim de garantir disponibilidade para as próximas gerações. Também é fundamento da PNRH o fato de que água é recurso natural limitado, dotado de valor econômico. Da mesma forma, é instrumento da Política a cobrança pelo uso dos Recursos Hídricos e, de maneira semelhante, a Política Nacional de Saneamento Básico - PNSB - estabelece como um de seus princípios fundamentais a adoção de medidas de fomento à moderação do consumo de água.

Sabe-se que o crescimento populacional é fator que impacta globalmente na demanda por água e no Distrito Federal a situação não é diferente. De acordo com de Castro (2018), apesar da constante redução no consumo per capita, o consumo de água no Distrito Federal - DF apresenta variação positiva em função do crescimento populacional. Ainda, segundo ADASA e Caesb (2018), o consumo per capita no DF apresenta redução sistemática a partir de 2012, passando de 175 L/hab/dia para 149 L/hab/dia em 2016 enquanto o consumo médio mensal se apresentou na faixa de 13 a 14 milhões de m<sup>3</sup>/mês entre 2012 e 2016, com variações positivas.

Nos últimos anos a situação de disponibilidade hídrica na região se agravou e os seus dois principais reservatórios - Descoberto e Santa Maria - atingiram níveis abaixo do esperado. Assim, o estudo do consumo de água tem fundamental importância para compreensão e proposição de Políticas Públicas que mirem o uso sustentável dos Recursos Hídricos.

De Castro (2018) mostra que o consumo em residências representa a maior parcela de consumo de água de água potável no Distrito Federal, somando, para a maior parte do território, mais de 90% da água consumida.

Em geral, os sistemas de abastecimento de água podem ser divididos em cinco subsistemas: captação de água bruta, reserva de água bruta, tratamento de água, reserva de água potável

e rede de distribuição de água. Sendo neste último onde ocorre a entrega ao consumidor final com a vinculação dos medidores de consumo à tubulação da concessionária.

No Distrito Federal as redes de distribuição de água somam mais de 9.121,64 quilômetros de extensão e atendem mais de 2.779.922 usuários, totalizando percentual superior a 99% de atendimento da população. Caesb (2018).

Nesse cenário, a preocupação com o seu correto dimensionamento garantindo condições eficientes de operação e o abastecimento adequado da população é tema recorrente e cada vez mais necessário para garantir o uso sustentável dos recursos hídricos. Portanto, a definição de modelos para correta caracterização das redes de distribuição é fundamental para permitir planejamento e tomadas de decisão acertadas no que diz respeito ao correto uso da água tratada.

A modelagem de sistemas de distribuição de água é assunto de inúmeros trabalhos científicos que visam aproximar os valores observados com auxílio de equipamentos de medição de pressão e vazão àqueles calculados a partir de modelos hidráulicos desenvolvidos. A evolução da modelagem de redes de distribuição de água tem início com utilização de modelos experimentais e cálculos manuais, passando pela utilização de *softwares* com essa finalidade e chegando a modelos que envolvem o aperfeiçoamento da linguagem de programação dos *softwares* com aplicação de técnicas de otimização.

Ainda no campo da modelagem hidráulica e afim de aumentar a sua confiabilidade, a correta determinação do consumo de água é fator primordial. A grande variabilidade e aleatoriedade dos padrões de utilização dos recursos hídricos prejudica sobremaneira a adoção de valores corretos para as vazões de demanda, parâmetro fundamental para exatidão dos resultados de modelos propostos.

Neste contexto, a medição inteligente do consumo de água é capaz de fornecer dados de consumo em uma resolução espacial e temporal muito mais específica, isto é: em nível de consumidor individual e em pequenos intervalos de tempo, possibilitando a utilização de ferramentas de análise de dados para caracterizações mais precisas dos perfis de consumo. A utilização de medidores inteligentes fornece informação essencial para construção de

modelos de comportamento dos consumidores que podem ser utilizados para modificar o comportamento favorecendo a economia de água.

Além de ser ferramenta importante para auxiliar na construção de padrões de consumo, a medição com medidores inteligentes permite a construção de modelos úteis para detecção de vazamentos, reduzindo perdas e aprimorando a gestão da demanda.

As perdas de água em redes de distribuição são calculadas a partir da diferença entre volume de entrada e volume fornecido aos consumidores. A redução das perdas auxilia na preservação do volume disponível nos mananciais e pode reduzir a necessidade de investimentos em infraestrutura, como a instalação de novos sistemas de captação e tratamento.

O presente trabalho tem seu foco na Quadra 12 do Setor Habitacional Jardins Mangueiral - SHJM - na Região Administrativa de São Sebastião/DF, sendo meta avaliar os benefícios do sistema de medição por telemetria implantado no projeto piloto da individualização de hidrômetros, propondo estudo, modelagem e ferramentas de gestão dos dados de consumo obtidos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar impactos do sistema de medição por telemetria implantado no projeto piloto de individualização de hidrômetros da Quadra 12 do SHJM, Região Administrativa de São Sebastião/DF, propondo estudo, modelagem e ferramentas de gestão dos dados de consumo de água do condomínio e das unidades habitacionais.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar os impactos da implantação do sistema de telemetria no condomínio;
- Avaliar possíveis impactos do estudo, da modelagem e de ferramentas de gestão dos dados de consumo do condomínio obtidos por telemetria;
- Avaliar oportunidades para futuros trabalhos, a partir do sistema de telemetria do condomínio;
- Estudar série temporal do consumo de água referente às medições do hidrômetro geral do condomínio (macromedidor) para propor modelo capaz de representar o consumo do condomínio;
- Estudar série temporal do consumo de água referente às medições dos hidrômetros individuais das unidades de consumo e das áreas comuns do condomínio para propor modelos capazes de representar o consumo das unidades;
- Avaliar modelos para determinação do consumo de água utilizando dados de telemetria, permitindo a previsão do consumo e a otimização da operação e manutenção da rede, assim como a otimização do dimensionamento de novas redes similares;
- Analisar balanço hídrico da rede de água do condomínio utilizando os dados da telemetria e de medição de vazão para avaliar as perdas de água na rede de distribuição;
- Propor sistema capaz de analisar a ocorrência de vazamentos e/ou falhas de medição, nas unidades micromedidas, utilizando dados da telemetria.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO DA LITERATURA

Nessa parte são apresentados os fundamentos teóricos que balizam o trabalho. A divisão do capítulo considera três temas fundamentais, são eles: o consumo residencial de água potável, as perdas de água em redes de distribuição, e a medição de água inteligente e a telemetria.

#### 3.1 CONSUMO RESIDENCIAL DE ÁGUA POTÁVEL

Segundo Arbués et al. (2016), desde os anos 60 a avaliação da demanda de água tem sido intensivamente estudada e, a partir de então, o foco dos estudos é a avaliação da demanda municipal com protagonismo da avaliação da demanda residencial.

De acordo com Seguido (2017), o estudo do padrão de consumo de água potável em edificações residenciais se concentra em cinco vertentes principais quais sejam: a) o estudo do impacto dos fatores sócio-demográficos no consumo, como o número de habitantes por residência e a idade dos usuários; b) o estudo do impacto de fatores políticos e econômicos, como renda per capita e tarifa de água; c) o estudo da influência de aspectos psicológicos dos usuários, tais como consciência ambiental e sentimento de pertencimento à região que habita; d) o estudo do impacto de fatores de urbanização, como idade e características construtivas das edificações e finalmente; d) o estudo da influência de fatores climáticos, como variação de temperatura e do volume de precipitação. A Figura 1, apresentada a seguir sintetiza os principais fatores que impactam no consumo de água potável:



Figura 01 – Fatores que influenciam o consumo de água potável.

Quanto aos aspectos sóciodemográficos, análises estatísticas de De La Cruz et al. (2016) revelam algumas das variáveis significantes que impactam no consumo doméstico de água, são elas: custo, número de banheiros nas residências, existência de medição do consumo, utilização de água engarrafada e purificada e número de habitantes do sexo feminino nas unidades.

Resultados dos estudos de Domene e Saurí (2006) sobre fatores de urbanização que influenciam o consumo de água na região metropolitana de Barcelona mostraram que a renda, o tipo de moradia, a existência de área externa, o tipo de espécies plantadas em jardins e a consciência do usuário sobre práticas de conservação são aspectos que exercem papel importante na explicação das variações no consumo de água.

Romano et al. (2015) em estudo acerca dos aspectos determinantes da demanda de água na Itália confirmaram que as tarifas de água têm impacto na redução do consumo de água e que cidades com maiores parcelas da população atendidas pelo sistema de abastecimento apresentam níveis mais elevados de consumo. Sobre o impacto dos aspectos climáticos e geográficos, apenas a altitude mostrou impacto na redução do consumo. Os estudos também confirmaram que a natureza pública ou privada dos prestadores de serviço de abastecimento de água não tem efeito significativo na demanda e que as tarifas mais baixas são praticadas por pelas companhias de água de natureza pública quando comparadas com as privadas.

Na determinação de padrões de consumo de água em mais de 2300 edificações multifamiliares Kontokosta e Jain (2015) demonstraram que ocupação, tamanho, idade e intensidade de uso de energia da edificação, além de padrões demográficos da vizinhança e características socioeconômicas tem efeito estatístico significativo na intensidade do uso de água.

Schleich e Hillenbrand (2009) analisaram o impacto de diversos fatores econômicos, ambientais e sociais na demanda per capita de água para aproximadamente 600 áreas de abastecimento de água na Alemanha.

Ainda, de acordo com o que propõe o trabalho de Dias et al. (2017), dentro de uma gama de fatores avaliados, aqueles que mostraram maior influência sobre o consumo de água potável

em edificações residenciais foram: distância da propriedade até o centro da cidade, percentual de inquilinos na propriedade, idade da edificação, presença de coleta de esgoto sanitário, número de residentes, tipo de medição: individual ou coletiva, presença de sistemas alternativos de abastecimento de água e o valor de avaliação do imóvel.

Nesse contexto, constata-se evolução científica no que se refere à avaliação do consumo em unidades residenciais. Todavia, é ainda necessário desenvolver pesquisas que contemplem o aspecto regional do consumo de água. É imprescindível embasar estatisticamente modelos capazes de oferecer predições acertadas para tomada de decisão.

### **3.1.1 Modelagem do Consumo Residencial de Água Potável**

Considerando que o fator primordial para operação e gestão das redes de distribuição de água é a satisfação da demanda do usuário por água, é fundamental que as concessionárias de água sejam capazes de determinar, com elevada precisão, a demanda de água de curto, médio e longo prazo para oferecer o volume de água adequado com qualidade adequada. Nesse contexto, a seleção do modelo correto para previsão da demanda é fator importante para otimização das redes e de sua operação.

Classicamente, conforme Tsutiya (2006), para dimensionamento de redes de distribuição de água, é considerada como vazão nodal a vazão específica, obtida a partir da divisão da vazão de distribuição (demanda necessária para atender determinada população), cuja cálculo se dá conforme equação 01, pela área a ser abastecida ou extensão dos trechos de rede:

$$Q = \frac{K_1 K_2 P q}{86.400} \quad (1)$$

Onde Q é a vazão em l/s; K1 é o coeficiente do dia de maior consumo, K2 é coeficiente da hora de maior consumo, P é população final para área a ser abastecida em hab. e q é consumo *per capita* final de água em l/hab.dia. O consumo *per capita* pode ser determinado pela leitura de micromedidores, instalados nas unidades consumidoras, macromedidores, instalados na saída do reservatório de distribuição, ou considerando o consumo de regiões com características semelhantes.

Considerando a grande variabilidade do consumo de água, muitos são os modelos que simulam a demanda. Em geral, a fim de reduzir essas inseguranças, os modelos utilizam dados de consumo existentes ou propõem uma previsão, Borges (2003). Neste sentido, são muitos os trabalhos dedicados a elucidar o problema da determinação da demanda.

Carpentier e Cohen (1991) apresentaram uma técnica para estimar a demanda e a detecção de vazamentos utilizando valores de vazão das tubulações em regime permanente.

Já a hipótese do estudo de Buchberger e Wu (1995) é de que o uso residencial da água pode ser caracterizado com três variáveis: intensidade, duração e frequência. Sendo que essas três propriedades podem ser modeladas como um processo não homogêneo de pulsos retangulares, onde a frequência do uso de água é aproximada aos processos de chegada de uma Distribuição de Poisson com um parâmetro dependente do tempo, isto é, quando há utilização de água, um pulso retangular de duração e intensidade randômicos é gerado. O trabalho, realizado para pontas secas de redes de distribuição, adota para o uso residencial de água o conceito da teoria das filas, onde os moradores são usuários e os pontos de uso são os servidores disponíveis.

Oshima e Kosuda (1998) elaboraram um modelo para determinação do consumo de água horário utilizando o método do caos reconstruído pelo método *fuzzy* local, que resultou em benefícios com o estabelecimento de estratégias mais adequadas de bombeamento entre captação e reservatórios de distribuição. O método do caos utiliza uma série de dados observados que tem sua extrapolação substituída pela interpolação em  $n$  dimensões, utilizando a teoria da incorporação, com um vetor da série de dados que considera a dimensão de incorporação e tempos anteriores. As dimensões são construídas a partir da série original, levando em consideração a menor complexidade da interpolação quando comparada com a extrapolação.

Jain e Ormsbee (2002) desenvolveram técnicas utilizadas (08 modelos distintos, entre eles modelos convencionais e modelos com utilização de Inteligência Artificial -AI) para previsão do consumo diário, mostrando que os métodos que utilizam AI se sobressaem quando comparados aos métodos convencionais.

Davidson e Bouchart (2006) utilizaram algoritmos para ajustar as demandas estimadas comparando o modelo com o “*supervisory control and data acquisition*” - SCADA utilizando a combinação entre heurística e mínimos quadrados ponderados.

Kumar et al (2008) propôs um método de estimativas de parâmetros de estado para redes de distribuição bem instrumentadas. Foi aplicado o método a duas redes urbanas, considerando medidas de vazão na tubulação, pressão no nós e valores de demanda por água.

Kang e Lansey (2009), considerando a importância da determinação em tempo real dos valores de consumo de água, afirmam que a indústria da água precisa de estimativa em tempo real das variáveis de estado, como pressão nodal e qualidade da água, para propósitos de controle e de operação. A estimativa em tempo real pode levar à economia de tempo e dinheiro e promover melhor serviço aos usuários da rede.

O estudo de Kang e Lansey (2009) apresenta uma estimativa da demanda nodal em tempo real combinando medidas de campo com modelo de simulação (EPANET Toolkit) que resolve as relações hidráulicas não lineares a seguir:

$$\sum_{l \in J_{en,i}} Q_l - \sum_{l \in J_{sa,i}} Q_l = q_i \quad (2)$$

Em que:  $Q_l$  é a vazão dos tubos (vazões que chegam aos nós são positivas),  $q_i$  a demanda dos nós,  $J_{en,i}$  e  $J_{sa,i}$  são, respectivamente, o conjunto de tubos alimentando e sendo alimentados pelo nó.

$$H_A - H_B = h_{L,l} \quad (3)$$

Em que:  $H_A$  e  $H_B$  são a energia total nos nós a e b, respectivamente, e  $h_{L,l}$  é a perda de carga no tubo l.

$$h_L = K_u \left( \frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1.852} \frac{L}{D^{4.87}} \quad (4)$$

Em que:  $K_u$  é a constante de unidade,  $D$ ,  $L$ ,  $Q$  e  $CHW$  são, respectivamente, diâmetro, comprimento, vazão e coeficiente de rugosidade da fórmula de Hazen-Williams.

Adicionalmente, Kang e Lansey (2009) estimam, em tempo real, as pressões nos nós da rede e as concentrações de cloro, considerando as demandas estimadas.

Em um outro contexto, Koppel e Vassiljev (2013) estimam a vazão em tempo real nas redes de distribuição utilizando medições de valores de pressão e sugerem que os modelos computacionais para redes de distribuição de água devem contemplar informações de demanda, entretanto, as informações de consumo de água são medidas em períodos relativamente longos, por exemplo mensalmente, o que resulta na disponibilidade apenas da demanda base média. A dinâmica para obtenção destes valores médios de demanda considera o padrão de consumo das diferentes categorias de consumo e são apenas utilizadas devido ausência de informação mais detalhada.

Já Torrent e Pérez (2020) modelaram o consumo médio diário de água a partir de dados de vazão em tempo real de vários distritos de medição, com a utilização de curvas potenciais. O modelo se baseia em dados de um medidor de vazão organizados em uma série temporal, ordenada da maior para menor medição do equipamento. A partir da ordenação, as frequências são calculadas e a vazão se ajusta a uma equação exponencial com parâmetros de crescimento  $k$  e  $a$ . Para os menores valores de vazão, o comportamento pode ser côncavo ou convexo e esses comportamentos podem ser ajustados por uma equação exponencial inversa com parâmetros  $k$  e  $a'$ . Das formulações resulta a equação para cada medidor de vazão, apresentada na sequência:

$$Y_i = k f_i^{-a} (1 - f_i)^{a'} + N \quad (5)$$

Onde  $Y_i$  é a vazão estimada,  $f_i$  as respectivas frequências e  $N$  é a mínima vazão de consumo. Daí, após cálculo do consumo diário e aplicando o conceito de séries de Taylor, os autores obtém a expressão para estimar o consumo médio diário de água minimizando o erro entre valores medidos e valores calculados.

A partir de dados obtidos com a instalação de um medidor de vazão eletromagnético, Guidi (2016) realizou regressão linear multivariada - técnica estatística para construção de modelos que explicam adequadamente relações entre variáveis explicativas e variável modelada - para previsão de demanda em trecho do sistema de abastecimento da cidade de Franca-SP. A obtenção da equação que representasse a vazão de demanda considerou variáveis explicativas como: dia da semana, vazão na hora anterior e vazão na semana anterior.

Anele et al. (2017) apresentaram uma visão global sobre os modelos utilizados para previsões de curto prazo do consumo de água. Dentre os modelos avaliados, se destacam para esse trabalho aqueles que abordam séries temporais: autorregressão (AR), médias móveis (MA), média móvel autorregressiva (ARMA) e média móvel autorregressiva integrada (ARIMA). Este último trata da aplicação da autorregressão e das médias móveis para séries temporais que podem ou não ser estacionárias. Modelos autorregressivos consideram que o valor do consumo de água se relaciona com os valores de consumo em tempos anteriores, já os modelos de médias móveis consideram que o valor de consumo se relaciona com a média dos valores do consumo em tempos anteriores. As equações a seguir representam o modelo ARIMA:

$$AR = c + \phi_1 Y_{t-1} + \dots + \phi_n Y_{t-n} \quad (6)$$

$$MA = c + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_n \varepsilon_{t-n} \quad (7)$$

$$I_1 = Y'_t = Y_t - Y_{t-1} \quad (8)$$

$$ARIMA = AR + I + MA \quad (9)$$

Onde  $c$  é o valor de uma constante ou intercepto no eixo  $y$ ,  $\phi$  são os coeficientes do fator da autorregressivo,  $Y_t$  são observações em determinado tempo  $t$ ,  $\theta$  são os coeficientes do fator de médias móveis,  $\varepsilon_t$  são os erros aleatórios no instante  $t$ ,  $Y'_t$  são os componentes das diferenças tomadas da série.

Para os casos em que se verifica sazonalidade da série temporal, isto é, quando é possível observar um comportamento cíclico dos dados, pode-se utilizar o modelo sazonal ARIMA ou SARIMA, que é formado pela inclusão de termos sazonais no modelo ARIMA. O modelo SARIMA, portanto, apresenta uma parte não sazonal, denotada pelos parâmetros  $(p,d,q)$ , semelhantes ao modelo ARIMA, e uma parte sazonal, denotada pelas letras  $(P,D,Q)_s$ , que

dizem respeito respectivamente a parcela autorregressiva (P), a estacionaridade (D), as médias móveis da sazonalidade (Q), e a quantidade de observações até que a sazonalidade ocorra (s). Para formulação dos modelos SARIMA, utiliza-se a notação de “*Backshift*” (B), muito utilizada para a distância entre dados de séries temporais e que significa o deslocamento dos dados em um período, isto é:

$$B_{Y_t} = Y_{t-1} \quad (10)$$

Onde,  $Y_t$  é o dado avaliado e  $Y_{t-1}$  é o dado imediatamente anterior.

A partir da notação são desenvolvidos os processos de diferenciação dos modelos, e ela é particularmente útil ao combinar diferenciações, dado que o operador pode ser tratado com a utilização de regras algébricas comuns.

Finalmente, destaca-se que os métodos que empregam a avaliação de séries temporais são úteis para previsões operacionais de curto prazo, todavia, podem não ser a alternativa mais precisa quando mudanças climáticas devem ser levadas em consideração.

### **3.1.2 Avaliação do Erro em Modelos de Previsão**

A avaliação do erro associado é outro tema fundamental quando se trata da modelagem da demanda de água por usuários de determinada rede de distribuição. Além de revelar possíveis e necessárias revisões de modelos, a análise do erro é capaz de mensurar a precisão das estimativas a partir de uma comparação entre valores simulados e valores observados. Em geral, a avaliação do erro associado para seleção do modelo para previsão de demanda se dá de acordo com as seguintes etapas:

- Divisão da base de dados em período a ser simulado e período de teste;
- Utilização dos dados de período a ser simulado para modelar o consumo;
- Avaliação da precisão dos modelos comparando os valores estimados com os valores observados do período de teste;
- Seleção do melhor modelo considerando sua performance, medida pela avaliação do erro associado.

Na sequência são apresentadas as formulações utilizadas por Torrent e Pérez (2020) para avaliação do erro de seus modelos:

$$Err_{com} = Err_p + Err_s \quad (11)$$

$$Err_p = \sum_1^{n_d} (1 + |Y_i - Y'_i|)^{n_e} \quad (12)$$

$$n_e = 2 - \frac{P(Y_i)}{P_{max}} \quad (13)$$

$$Err_s = \sum_{n=0}^{n=4} (\mu_n - \mu'_n)^2 + (\mu_n^{sim} - \mu'^{sim}_n)^2 \quad (14)$$

Onde  $Err_{com}$  é o erro combinado;  $Err_p$  é o erro pontual;  $Err_s$  é o erro de forma;  $Y_i$  é o valor medido;  $Y'_i$  é o valor estimado;  $n_d$  é o número de medições realizadas;  $P(Y_i)$  é a frequência do valor medido,  $P_{max}$  é a frequência do maior valor medido;  $\mu_n$  é o momento de grau  $n$  do valor medido;  $\mu'_n$  é o momento de grau  $n$  do valor estimado;  $\mu_n^{sim}$  é o momento de grau  $n$  da curva simétrica, referente ao valor medido;  $\mu'^{sim}_n$  é o momento de grau  $n$  da curva simétrica, referente ao valor estimado. As frequências são as probabilidades de se obter valor superior aos medidos enquanto a curva simétrica considera a possibilidade de se obter valor inferior ao medido.

A importância da utilização do erro pontual e do erro de forma no trabalho de Torrent e Pérez (2020), referem-se respectivamente a necessidade de ponderar os extremos das curvas potenciais utilizadas para modelagem, e de evitar mínimos locais, induzidos por descontinuidades nos dados ou valores extremos.

Outras formulações frequentemente utilizadas para avaliação de erros em modelos de previsão são o Erro Médio Absoluto – MAE, o Erro Padrão Residual (RSE), e a Raiz do Erro Quadrático Médio – RMSE, calculados pelas equações que seguem:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y - Y_i| \quad (15)$$

$$RSE = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (Y - Y_i)^2} \quad (16)$$

$$RMSE = 100 * \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{n} \left( \frac{Y - Y_i}{Y} \right)^2} \quad (17)$$

Onde,  $n$  é a quantidade de dados,  $Y$  é o valor medido, e  $Y_i$  é o valor estimado.

Além da avaliação dos erros, existem outros critérios para seleção de modelos, dentre eles destaca-se o Critério de Informação de *Akaike* (AIC). O critério tem relação com a teoria da informação e é capaz de expressar quanto um modelo quanto um modelo perde de informação, fornecendo uma solução simples para escolher o melhor modelo, que será aquele em que se obtém o menor índice. Isto significa que o melhor modelo é o que aproxima os dados e resulta na menor perda de conhecimento.

### **3.2 PERDAS DE ÁGUA**

As perdas de água em um sistema de abastecimento são, segundo Lambert (1993), as diferenças entre a vazão apurada na entrada do sistema e a vazão fornecida aos usuários. Outro conceito importante associa a perda de água ao aumento dos custos de produção de água, que dificultam a obtenção da receita operacional plena.

ABES (2015) considera que as perdas de água envolvem mais do que os aspectos técnicos e econômicos, estando associadas também a aspectos políticos, sociais, legais e ambientais:

- Aspectos técnicos: capacitação de profissionais, ferramentas técnicas e métodos disponíveis para o combate às perdas;
- Aspectos econômicos: relacionam-se com os custos da água perdida e não faturada, custos de operação e investimentos que envolvem os mecanismos de redução de perdas a serem implantados;
- Aspectos Políticos: referem-se aos prestadores de serviços, que podem ser públicos ou não, agências de regulação, bancos públicos, privados ou internacionais responsáveis pelo financiamento e a imprensa;
- Aspectos Sociais: conscientização da população sobre o uso racional da água, políticas tarifárias, saúde pública e a qualidade do atendimento prestado ao público pelas concessionárias;
- Aspectos Legais: conjunto de normativos e leis que regulam a prestação do serviço de abastecimento;

- Aspectos Ambientais: utilização sustentável dos recursos hídricos e energéticos, além do possível impacto ambiental da implantação de novos sistemas de abastecimento.

Para operação de sistemas de distribuição de água, o nível de perda de água é indicador fundamental. Quando bem planejada, além de aumentar a eficiência do sistema de abastecimento, uma política de redução de perdas é capaz de reduzir custos de implementação de novos sistemas de captação e tratamento. De acordo com Mazzolani et al (2016), a redução de perdas significa a redução no gasto de energia elétrica, redução no custo de tratamento e adução de água, redução com as despesas geradas por danos a terceiros e, finalmente, redução da emissão de gases de efeito estufa.

Todavia, é preciso ressaltar que as perdas de água são inerentes a qualquer sistema de abastecimento e ocorrem em todas as etapas do processo de produção de água tratada. Há perda de água na captação, no tratamento e na distribuição. Segundo Gonçalves (1998), as perdas de água em unidades operacionais de um sistema de abastecimento podem ser divididas em cinco grupos:

1. Perdas em adutoras: são vazamentos em no trecho entre captação e tratamento e tratamento e distribuição. Podem ser causados por transientes hidráulicos, movimentos de solo, qualidade dos materiais, ausência de manutenção e acidentes que danifiquem ou perfurem a tubulação (e.g. tráfego de veículos, construções, entre outros);
2. Perdas no tratamento de água: vazamentos nas estações de tratamento de água. Podem ser causados por falha na operação, problemas de estanqueidade em equipamentos do tratamento, problemas de comunicação e dos projetos de execução.
3. Perdas em reservatórios: vazamentos nos reservatórios de água. Se devem, em geral, a problemas de operação, estanqueidade e extravasamento ou transbordamento;
4. Perdas na rede de distribuição: vazamentos ou ausência de controle das redes que distribuem a água oriunda da reservação aos consumidores. Também podem ser causados por transientes hidráulicos, movimentos de solo, qualidade dos materiais, ausência de manutenção e acidentes que danifiquem ou perfurem a tubulação, a situação pode ser agravada caso o cadastro técnico das redes seja problemático.

Adicionalmente, as ligações clandestinas contribuem para perdas de água nessa fase do abastecimento.

5. Perdas nas unidades consumidoras: volumes consumidos e não computados pelos aparelhos de medição. Causados pela ausência ou inadequação dos hidrômetros instalados para aferir o consumo dos usuários e pelas intervenções fraudulentas dos usuários (e.g. instalação de caminho alternativo para consumo de água sem que ela passe pelos medidores, fraude do equipamento de medição, entre outros).

Nesse contexto, conforme Sánchez et al. (2020), programas de controle de perdas de água são fundamentais na gestão dos sistemas hídricos. Seu objetivo é planejar uma estratégia econômica para controlar perdas excessivas, com base na identificação das intervenções mais viáveis no sistema de água. Como ilustrado na figura 02, um programa de perda de água compreende três partes essenciais: avaliação do balanço hídrico, intervenções e avaliação dos resultados.



Figura 02 – Fluxograma de um programa de controle de perdas.

### 3.2.1 Balanço Hídrico

A matriz do balanço hídrico (Figura 2), proposta pela *International Water Association* (IWA), é o lastro conceitual dos problemas de perdas nos sistemas de abastecimento de água. De acordo com o Instituto Regulador de Águas e Resíduos de Portugal – IRAR (2005),

Associação de Água e Esgoto da Nova Zelândia (2010) e ABES (2015), são componentes da matriz as categorias listadas na sequência:

- Volume produzido ou disponibilizado: volume total produzido pelo sistema de abastecimentos, isto é, volume total captado nos mananciais utilizados para abastecimento;
- Consumos autorizados: volume de água conhecido que é consumido com conhecimento dos prestadores de serviço, são divididos em duas subcategorias:
  - Consumos autorizados faturados: volumes de água medidos e faturados ou estimados e faturados;
  - Consumos autorizados não faturados: volumes de água medidos e não faturados ou volumes não medidos e não faturados, desde que com autorização do prestador de serviços.
- Perdas de água: volumes de água que são perdidos ao longo do sistema de distribuição sem autorização e sem o conhecimento do prestador de serviço, são divididas em duas subcategorias:
  - Perdas aparentes: volumes de água consumidos sem autorização do prestador de serviço e não contabilizados, seja por problemas com os aparelhos de medição, seja por fraudes ou qualquer outro tipo de problema dos sistemas comerciais;
  - Perdas reais: volumes de água perdidos com vazamentos ao longo do sistema de abastecimento. Podem ser nas adutoras, nas estações de tratamento, nos reservatórios e nas redes de distribuição.

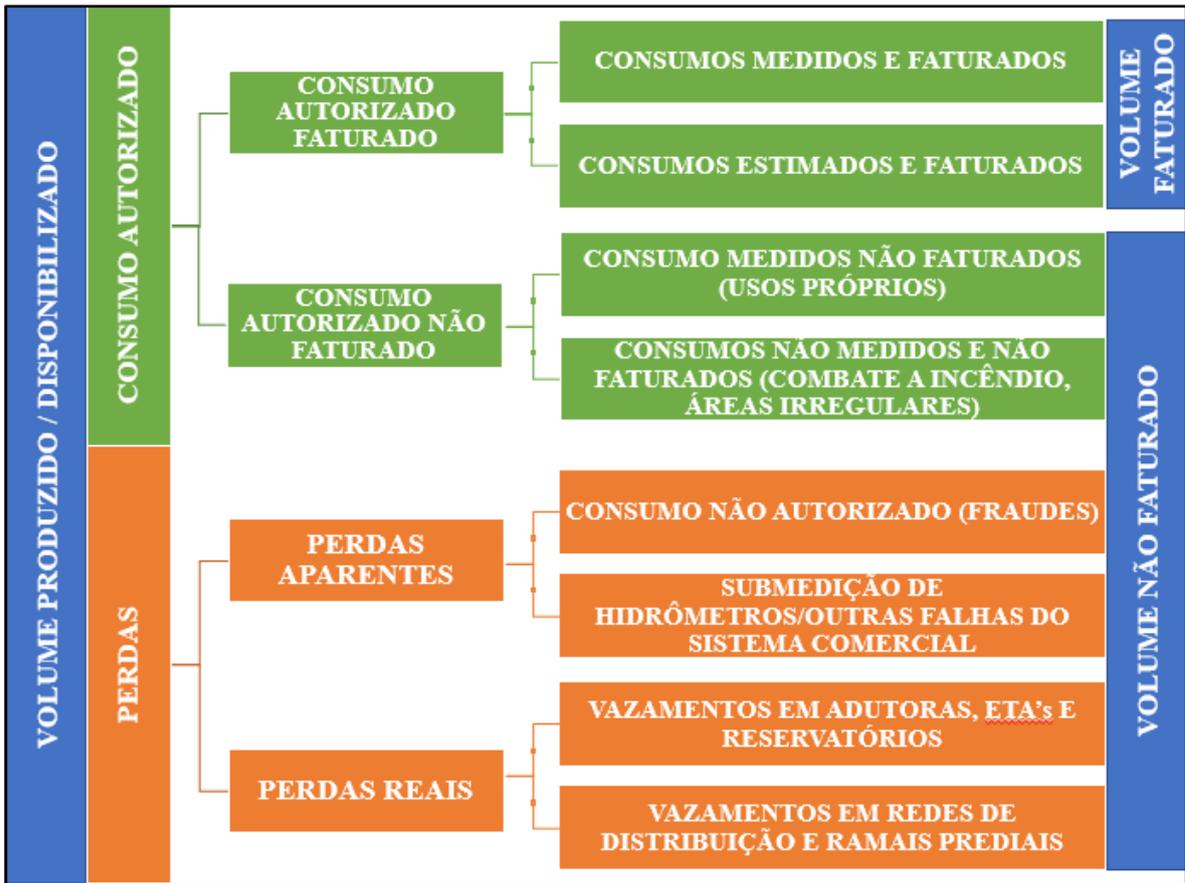


Figura 03 – Matriz do balanço hídrico.

Nesse contexto, o grande desafio das concessionárias de água é reduzir os níveis de perda com o aumento da eficiência da infraestrutura de abastecimento. Para tanto, a abordagem preditiva da operação e da manutenção dos sistemas, principalmente do sistema de distribuição de água, são fundamentais.

É também fundamental destacar que o controle do balanço hídrico pode ser realizado em escalas menores, isto é, desde que se controle a vazão ou o volume de entrada, é possível avaliar contextos mais restritos, como redes de distribuição e até mesmo partes da rede de distribuição. Esse tipo de abordagem torna possível a priorização de áreas problemáticas considerando a quantidade de recursos disponíveis.

### 3.2.2 Perdas Reais

Como supramencionado, as perdas reais são aquelas decorrentes de vazamento ao longo das etapas do sistema de abastecimento de água, com predominância nas redes de distribuição de água. Segundo IWA (2007) as perdas reais são de dois tipos:

- Vazamento inerentes: somatório de todos pequenos vazamentos na rede de distribuição, que são visualmente ou acusticamente indetectáveis e são bastante influenciados pelo gerenciamento da pressão (são vazamentos com vazões menores de 0,25 m<sup>3</sup>/h para uma pressão disponível de 50 mca);
- Rompimentos: resulta de rompimentos no sistema de abastecimentos e podem ser relatados ou não relatados. O volume de água perdido nos rompimentos é influenciado pela velocidade com a qual são localizados, identificados e reparados. Portanto, o tempo necessário para o reparo é o indicador a ser controlado.

Os métodos para estimar as perdas reais são divididas em dois tipos de abordagem: de cima para baixo ou de baixo para cima. No primeiro tipo de abordagem as medidas ou estimativas dos diferentes componentes do balanço hídrico são utilizadas para obter os volumes de vazamentos. Assim, a confiabilidade deste tipo de estimativa depende da confiabilidade da medição do consumo de água. Em geral, a abordagem de cima para baixo utiliza longos períodos de análise, dependendo dos dados de consumo coletados.

Já no segundo tipo de abordagem - de baixo para cima - a avaliação de vazamentos é baseada na análise de dados de vazão ou pressão monitorados em uma rede de distribuição de água. Por esta razão, esses modelos são considerados mais dependentes de dados e mais trabalhosos, tendo em vista que necessitam de dados mais acurados e atualizados. A avaliação da mínima vazão noturna – MNF - é um dos métodos de análise de vazamentos (do tipo de baixo para cima) mais divulgados, e permite estimar as perdas reais de um sistema, subtraindo o consumo autorizado esperado da vazão de entrada. O método permite que níveis de perda de água sejam avaliados na ausência de dados de consumo confiáveis.

No presente trabalho serão considerados dois métodos de avaliação de perdas reais, podendo as duas serem consideradas como abordagens do tipo de baixo para cima, já que a grande maioria dos dados a serem avaliados nos capítulos de metodologia e resultados são dados de vazão. Contudo, os indicadores de perdas totais utilizados neste trabalho derivam de uma abordagem do tipo de cima para baixo, a partir da construção da matriz de balanço hídrico da rede avaliada.

Um dos métodos destacados para avaliação das perdas reais é o apresentado por Mazzolani et al (2016), inspirado na análise de dados da vazão de entrada, com tempo de coleta de 10 minutos, em redes de distribuição de água, com categoria de consumo predominantemente residencial. O estudo mostra que a vazão média noturna da rede (medida entre 02h00min e 04h00min) segue a mesma tendência da vazão média diária (medida entre 00h00min e 23h50min). Contudo, o quociente entre vazão média noturna e vazão média diária não é constante durante o ano e cai durante a temporada de pico do consumo. Essa observação denota que a redução ocorre sem nenhuma relação com a demanda humana, mas sim com fatores hidráulicos das redes, as perdas reais.

Assim, assumindo que: 1) a variação de pressão na rede pode ser desconsiderada; 2) A razão entre demanda noturna e diária de água é invariável durante todo o período analisado; 3) Vazamentos não ocorreram e reparos na rede não foram realizados durante o período analisado, e que: 4) A série temporal da vazão de entrada na rede de distribuição está disponível como uma sequência discreta de valores com intervalo constante de coleta; Mazzolani et al (2016) propõe as seguintes formulações para determinar o volume de perdas reais:

$$\frac{Q_{N,d} - Q_{LN,d}}{Q_d - Q_{L,d}} = K \quad (18)$$

$$\frac{V_{N,d} - L_N}{V_d - L_N} = K \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} KV_{d=1} - KL_N + L_N = V_{N,d=1} \\ KV_{d=2} - KL_N + L_N = V_{N,d=2} \\ \dots \\ KV_{d=n} - KL_N + L_N = V_{N,d=n} \end{array} \right\} \quad (20)$$

Onde,  $Q_{N,d}$  e  $Q_d$  são, respectivamente, a vazão média noturna e a vazão média diária de água;  $Q_{LN,d}$  e  $Q_{L,d}$  são, respectivamente, o vazamento médio noturno e o vazamento médio diário;  $V_{N,d}$  e  $V_d$  são, respectivamente, o volume médio noturno e o volume médio diário de água que entrou no sistema;  $L_N$  é o volume médio noturno de vazamento, que pode ser aproximado ao volume médio diário de vazamento para redes com pressões disponíveis aproximadamente constantes;  $K$  é um coeficiente; e  $n$  a quantidade de dias do período analisado.

Monitorando uma rede de distribuição por n dias e com os dados de vazão de entrada, é possível solucionar o sistema não linear (20) e determinar o coeficiente K, assim como o valor médio do volume de vazamentos na rede e conseqüentemente o seu percentual de perdas reais.

O outro método que merece destaque é o apresentado por van Thienen (2013): a comparação entre padrões de distribuição de vazão - CFPD. O procedimento é utilizado para comparar conjuntos de dados de consumo de água de períodos diferentes, ou para comparar conjuntos de dados de consumo de um mesmo período dividido em intervalos menores. Trata-se de um método relativamente simples que emprega regressão linear para avaliar variações (consistentes e inconsistentes) na demanda por água de uma determinada rede de abastecimento. O método requer a adoção do passo a passo expresso a seguir:

1. Classificar os dois conjuntos de dados do menor valor para o maior valor em magnitude;
2. Caso os conjuntos de dados tenham dimensão distinta, redimensionar um deles, preferencialmente o mais longo, fazendo uma interpolação de modo que os dois conjuntos de dados fiquem do mesmo tamanho;
3. Plotar o conjunto de dados mais antigo no eixo X e o mais recente no eixo Y;
4. Usando regressão linear, determinar o melhor ajuste para os coeficientes “a” (declividade) e “b” (interseção) na equação (21):

$$Y = aX + b \quad (21)$$

Onde, Y são os valores do conjunto de dados mais recente, X os valores do conjunto de dados mais antigo, a o melhor ajuste para o coeficiente angular e b o melhor ajuste para o intercepto.

A Figura 04, apresentada na sequência, representa o processo necessário para implementação do CFPD, em um período de dois dias de dados de consumo horário de água. No gráfico A é possível avaliar os dois conjuntos de dados plotados. No gráfico B é possível ver a plotagem dos dois conjuntos de dados plotados após classificação crescente dos valores de consumo. Finalmente, no gráfico C é possível avaliar a linha de referência do CFPD ( $x=y$ )

e o ajuste linear entre os conjuntos de dados, com os valores de coeficiente angular e intercepto da equação (21).

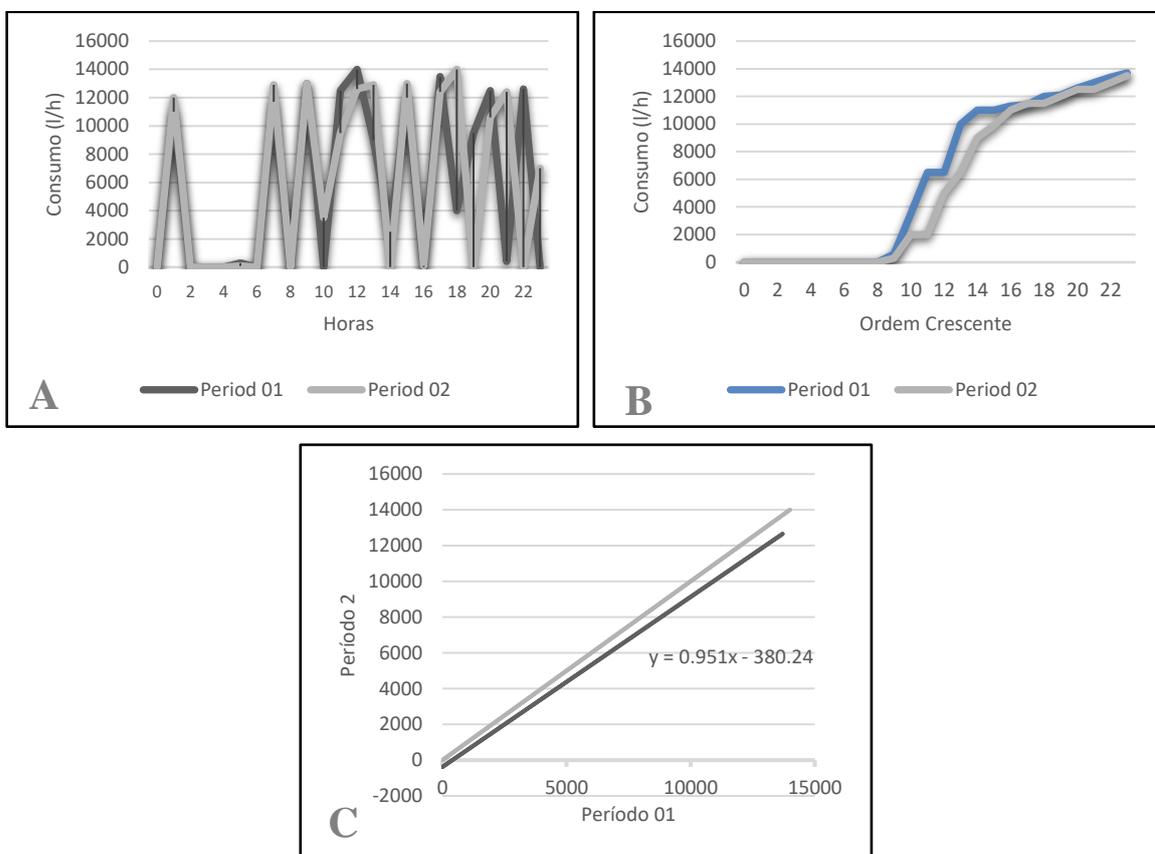


Figura 04 – Aplicação do CFPD para dois dias de consumo.

A interpretação dos resultados do CFPD quanto à alteração dos padrões de consumo de água, deve ser feita conforme Tabela 01, e se refere à comparação entre os coeficientes da reta de referência ( $x=y$ ) e os coeficientes obtidos a partir da regressão linear.

	<b>b = 0</b>	<b>b ≠ 0</b>
<b>a = 1</b>	Sem variação consistente e sem variação inconsistente (sem mudanças no padrão de consumo).	Ausência de variação consistente e variação inconsistente (mudança não padronizada do consumo ou vazamento).
<b>a ≠ 1</b>	Variação consistente e ausência de variação inconsistente (mudança no consumo seguindo determinado padrão).	Combinação de variação consistente e inconsistente (aumento no consumo seguindo padrão e não seguindo padrão/ou vazamento).

Tabela 01 – Interpretação dos resultados do CFPD.

Outra importante ferramenta para análise de variação de consumo a partir do método CFPD é a análise de blocos. Trata do resultado da técnica para um conjunto de períodos compilado em duas matrizes, uma para representar a variação do coeficiente angular e outra para representar as variações do intercepto. Este tipo de avaliação permite a comparação entre dois períodos dentro de um conjunto de dados de n períodos. O procedimento é feito considerando todas as combinações possíveis entre dois períodos pré-definidos, por exemplo: é possível comparar todas as combinações entre dois dias diferentes em um conjunto de dados diários com tamanho de um mês, ou então, pode-se comparar todas as combinações possíveis entre duas semanas diferentes em um conjunto de dados semanais com tamanho de vários meses.

A matriz A (Figura 04(A)), que representa a variação da inclinação das retas, é formada pela divisão do conjunto de dados em períodos pré-definidos. Esses períodos são as linhas e colunas (i e j) da matriz e as entradas  $A_{ij}$  são o melhor ajuste linear “a” na equação (21), para os períodos i e j. A matriz B (Figura 04(B)), que representa a variação do intercepto, está estruturada de maneira similar, sendo as entradas  $B_{ij}$  o melhor ajuste linear de “b” na equação (21). Destaca-se que as matrizes A e B são assimétricas em relação as suas diagonais, portanto, apenas o triângulo superior é apresentado nos resultados. A figura 04 mostra um diagrama do processo de análise de blocos, onde as entradas são coloridas em tonalidades de vermelho, de acordo com a variação positiva ou negativa (quanto maior a variação, mais escuro)

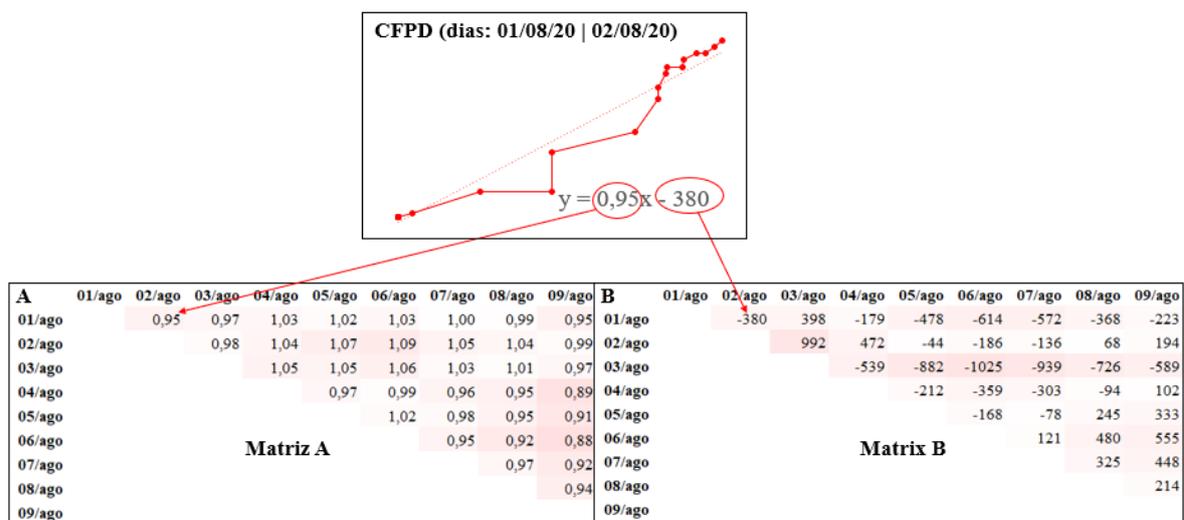


Figura 05 – Análise de blocos – CFPD.

Finalmente, ressalta-se que a qualidade dos dados é um componente importante para a eficácia do método (para reservatórios com grandes superfícies, são preferíveis os medidores de vazão aos medidores de nível). Nesse cenário, o intervalo de medição do consumo deve ser satisfatório para aplicação do CFPD. Em geral, quanto menor o intervalo de medição, mais eficaz é o método. De acordo com van Thienen (2013), para coeficientes angulares “a”, intervalos de 1 hora entre medições, mostram resultados com subestimações na casa dos milésimos quando comparados com intervalos de 1 minuto. Já intervalos de 4 horas, mostram resultados com desvios na casa dos centésimos. Para o coeficiente “b”, intervalos mais longos resultam em superestimação.

Os resultados do CFPD podem também ser afetados por erros de medição, eventos especiais e outros ruídos. Van Thienen (2013) relatou que para 5% de ruído gaussiano, o coeficiente “a” representou a realidade de forma satisfatória, enquanto a subestimação do coeficiente “b” foi relativamente elevada.

### **3.2.3 Perdas Aparentes**

Corroborando o exposto anteriormente, de acordo IRAR (2005), as perdas aparentes se referem à parcela que contabiliza as imprecisões nas medições de água e o consumo não autorizado.

Em geral, as perdas aparentes são obtidas a partir da construção do balanço hídrico, sendo a diferença entre volume de entrada no sistema e todas as outras variáveis, que devem ser conhecidas.

Torrent e Pérez (2020), de acordo com o método descrito em 3.2.1, utilizaram os parâmetros de curvas potenciais para estimar os componentes do balanço hídrico, incluindo perdas aparentes. De acordo com os autores, a equação (22), que determina o volume de perdas aparentes em uma rede de distribuição monitorada, deve considerar: o volume de entrada, os consumos medidos e as perdas reais.

$$P_A = V_E - V_C - P_R \quad (22)$$

Onde, Pa são as perdas aparentes, Ve é o volume de entrada na rede, Vc é o volume de água consumido e Pr é o volume de perdas reais na rede avaliada.

### 3.2.4 Indicadores de Perdas

Muitos são os indicadores utilizados para avaliação do nível de perdas em sistemas de abastecimento de água. Aqui destacamos alguns deles que serão utilizados durante o desenvolvimento dos estudos.

O primeiro é o índice de perdas na distribuição, descrito no Sistema Nacional de Indicadores sobre Saneamento - SNIS. O índice calcula a relação entre volume de água produzido e volume de água consumido, considerando, caso exista, o volume de água tratada importado de outros sistemas de abastecimento, e o volume de serviço, que é o volume utilizado pela concessionária de água. O cálculo do índice é feito conforme formulação apresentada a seguir:

$$I_P = \frac{V_P + V_I - V_C - V_S}{V_P + V_I - V_S} \times 100 \quad (23)$$

Onde, IP é o índice de perdas na distribuição, VP é o volume de água produzido, VI é o volume de água tratada importada, VC é o volume consumido e VS é o volume de serviço, todos em metros cúbicos.

Contudo, quando se compara sistemas de distribuição, ou quando se avalia a evolução das perdas em determinado um sistema, principalmente quando se avalia as perdas reais, o índice percentual pode sofrer distorções devido ao padrão de consumo *per capita*, que podem ser distintos nos sistemas ou sofrer alterações ao longo do tempo (quanto maior o consumo *per capita*, menor o índice de perdas na distribuição). As distorções geradas podem resultar em índices de perdas diferentes para volumes similares de perda real.

Nesse cenário, foram cunhados os indicadores que fazem referência à infraestrutura das redes de distribuição, associando o volume perdido à extensão da rede ou a quantidade de ramais/ligações. Dentre eles, está o índice de perdas por ligação, também descrito no SNIS.

O índice calcula o quociente entre volume produzido menos volume consumido e a quantidade de ligações de água ativas. O quociente também leva em conta volumes de serviço e volumes de água tratada importados e é calculado conforme a seguinte formulação:

$$I_L = \frac{V_P + V_I - V_C - V_S}{N_L} \times \frac{1.000.000}{365} \quad (24)$$

Onde,  $I_L$  é o índice de perdas por ligação (em l/dia/ligação),  $V_P$  é o volume de água produzido,  $V_I$  é o volume de água tratada importada,  $V_C$  é o volume consumido,  $V_S$  é o volume de serviço, todos aferidos anualmente e em metros cúbicos, e  $N_L$  é a quantidade de ligações ativas de água.

Todavia, destaca-se que IWA recomenda a utilização de indicadores de infraestrutura para avaliação da evolução de perdas totais em determinado sistema, mas não para comparações entre redes diferentes.

Para comparação de perdas reais entre sistemas, a IWA indica utilização do índice de vazamentos da infraestrutura - IVI. Similarmente, para avaliação das perdas aparentes, a IWA propõe utilização do índice de perdas aparentes - IPA. Tanto o IVI quanto o IPA são indicadores adimensionais cujos valores de referência são 1, sendo que o primeiro relaciona o volume aferido de perdas reais com um volume considerado inerente ao sistema, e o segundo compara o índice atualizado de perdas aparentes com o valor de 5% do volume micromedido – a referência de 5% está relacionada com o erro da micromedida e considera o abastecimento direto, sem emprego de reservatórios nas unidades consumidoras. Abaixo estão apresentadas as fórmulas de cálculo do IVI e do IPA:

$$IVI = \frac{V_{PR}}{V_{PRI}} \quad (25)$$

$$IPA = \frac{V_{PA}}{0,05} \quad (26)$$

Onde,  $V_{PR}$  é o volume de perdas reais aferido em  $m^3/lig.dia$ ,  $V_{PRI}$  é o volume de perdas inevitáveis em  $m^3/lig.dia$  e  $V_{PA}$  é o percentual de perdas aparentes.

Pondera-se que o IVI pode não ser adequado para avaliação de redes cujas pressões são baixas ou que atendem regiões com poucas ou baixa densidade de ligações.

### **3.2.5 Distritos de Medição e Controle**

IWA (2007) define que os distritos de medição e controle – DMC's são divisões da rede de distribuição de água que são abastecidas por um número limitado de redes principais, nas quais ficam instalados medidores de vazão, possibilitando quantificar regularmente o nível de vazamento em cada DMC, para que as atividades de localização e reparo de vazamentos sejam sempre direcionadas para as piores partes da rede.

Ainda de acordo com IWA (2007), um outro fator importante para adoção de DMC's é o fato deles serem facilitadores para o controle da pressão nas redes. A divisão da rede em DMC's facilita a criação de um sistema de controle de pressão permanente, permitindo a redução da pressão e conseqüentemente do nível de vazamentos, abaixando as taxas e a frequências de rompimentos nas tubulações. Redes de distribuição que são gerenciadas sem o uso de DMC's só alcançaram sucesso na redução de perdas, quando apresentaram uma combinação de infraestrutura de alta qualidade e em boas condições, um sistema de manutenção eficiente, e pressões baixas e estáveis.

O princípio de funcionamento da divisão da rede de abastecimento em DMC's se relaciona com a utilização dos valores de vazão de entrada para determinar os níveis de vazamento nos diferentes distritos, e a partir daí, priorizar áreas para trabalhos de manutenção e identificar o surgimento de novos rompimentos.

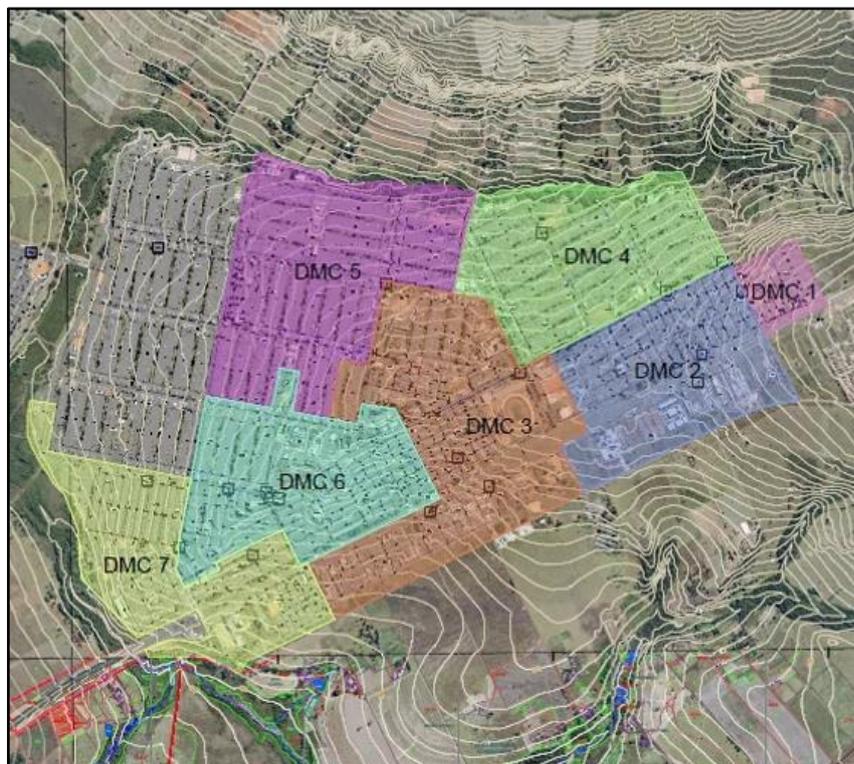
A IWA indica como fatores a serem considerados para dimensionamento de DMC's os que seguem:

1. O nível econômico de perdas requerido;
2. Tamanho em termos de área e número de usuários;
3. Categoria de consumo (comercial, residencial, industrial);
4. Elevação do solo;
5. Considerações sobre a qualidade da água;
6. Requisitos de pressão;

7. Reserva técnica de combate a incêndios;
8. Meta de redução de perdas;
9. Número de válvulas a serem fechadas;
10. Número de medidores de vazão a serem utilizados;
11. Grandes consumidores devem ter seus consumos medidos como valores exportados do DMC e;
12. Condições da infraestrutura disponível.

Para Gonçalves (1998), o início do trabalho de diminuição de perdas coincide com a setorização da rede, após delimitação de zonas de pressão e setores de manobra, possibilitando o isolamento de regiões a partir do fechamento de registros, como exemplificado na figura 05.

Itonaga (2005) considera que a setorização de rede objetiva uma área, ou microssistema da rede de abastecimento, hidráulicamente equilibrada, com baixos níveis de perdas e baixo consumo de energia, onde se possa controlar as pressões nos limites de intervalos pré-estabelecidos, fazendo coincidir, o quanto possível, sua configuração com as configurações de projeto, de operação e de comercialização.



Com a setorização, os DMCs são formados e o monitoramento da alimentação destes distritos é feito a partir de operações e equipamentos de macromedição e pitometria. É importante ressaltar que, além do abastecimento, para uma análise completa, o consumo de água dentro do setor deve também ser devidamente monitorado.

### **3.3 MEDIÇÃO DE ÁGUA E TELEMETRIA**

De acordo com Lima e Navas (2012) os sistemas de medição remota podem ser funcionalmente e fisicamente divididos em três segmentos: infraestrutura de medição, rede de comunicação e infraestrutura de tratamento e gestão dos dados.

A infraestrutura de medição consiste nos elementos necessários para organizar e coletar os dados de consumo dos usuários; a rede de comunicação permite que os dados de medição sejam transportados do ponto de coleta ou de instalação dos medidores até uma central de tratamento dos dados; já a infraestrutura para gerenciamento de dados corresponde fisicamente aos servidores e objetivam formar um banco de dados para gestão do conhecimento e para estabelecer uma visão clara e objetiva acerca dos elementos envolvidos.

Conforme Koech et al. (2018), os sistemas de medição de água com leitura remota se assemelham àqueles sistemas convencionais, sendo a única diferença a existência de aparelho acoplado que permite a geração de dados de consumo em tempos que se aproximam ao tempo real. A utilização de aparelhos de telemetria, além de disponibilizar informações de maneira remota, permite utilização dos dados para diferentes propósitos, dos quais se destacam: detecção de vazamentos, redução de perdas e gestão da demanda.

Com sistemas de leitura remota é possível obter com maior facilidade padrões de consumo de água para as diferentes categorias de consumo e reduzir o tempo de resposta para correção de vazamentos, promovendo uso mais sustentável dos recursos hídricos disponíveis.

Todavia, antes de abordar a medição automatizada, é necessário compreender alguns outros conceitos, como o de micromedição e o de medição individualizada. Também importante

entender o funcionamento dos equipamentos de medição de água, os hidrômetros e os medidores de vazão.

### **3.3.1 Micromedição e Hidrômetros**

Micromedição é o termo que se refere à apuração dos volumes de água consumidos pelos usuários finais dos sistemas de abastecimentos de água. Segundo IRAR (2005), a micromedição versa sobre a generalidade dos dados de consumo obtidos junto aos usuários de água para efeitos de faturamento.

Trata-se, portanto, da medição dos volumes de água utilizados pelo consumidor de qualquer uma das categorias de consumo (residencial, comercial, público ou industrial), após instalação de equipamentos de medição, os hidrômetros. A apuração é feita comparando as leituras dos medidores em determinado período, sendo o consumo a diferença entre elas. O somatório dos volumes computados pelos micromedidores é o volume consumido, que é, nos balanços hídricos, confrontado com os volumes apurados pela macromedição, que se relaciona com o controle dos volumes de entrada nos sistemas de abastecimento e nas redes de distribuição.

Entender como funcionam os hidrômetros, que podem funcionar tanto como macro quanto como micromedidores, é fundamental para compreender conceitos relacionados com perdas aparentes, balanço hídrico, consumos autorizados, entre outros.

Nesse sentido, a portaria nº 295 do INMETRO, de 29 de junho de 2018, que aprova o Regulamento Técnico Metrológico - RTM, estabelecendo as condições a que devem satisfazer os medidores para água potável fria e quente, define os hidrômetros como “instrumentos destinados a medir continuamente, memorizar e exibir o volume de água que escoar através de um transdutor de medição sob condições de medição”.

Já para a NBR 8009/1997, que define os termos empregados em hidrômetros taquimétricos, destinados à medição de água fria, o hidrômetro é o “instrumento destinado a indicar e totalizar, continuamente, o volume de água que o atravessa”.

De acordo com Silva (2008), os hidrômetros podem ser classificados com relação aos seus princípios de funcionamento e capacidade de medição/classe metrológica, e a escolha do medidor correto para determinada finalidade perpassa essas propriedades. As Tabelas 02 e 03 na sequência mostram a classificação em relação ao princípio de funcionamento e em relação a capacidade de medição/classe metrológica.

<b>Classificação</b>	<b>Princípio de Funcionamento</b>	<b>Tipos</b>
Velocimétrico <sup>1</sup>	Parte móvel (palheta, hélice, turbina) que é acionada diretamente pelo fluxo de água e transmite o movimento para dispositivo indicador.	Monojato: único jato de água incidindo sobre parte móvel.
		Multijato: vários jatos de água incidindo sobre parte móvel.
Volumétrico	Câmara de enchimento cilíndrica (com volume pré-definido) com uma peça móvel (pistão ou disco) que se movimenta a cada enchimento completo e transmite o movimento para dispositivo indicador.	Disco nutante: caracteriza-se por ter o disco como peça móvel.
		Pistão: caracteriza-se por ter o pistão como peça móvel.
Ultrassônico	Baseado na velocidade de propagação de ondas sonoras. Contam com sensores que emitem e recebem sinal ultrassônico.	Não aplicável
Eletromagnético	Considera a lei de indução eletromagnética para identificação do volume de água que passa pelo equipamento	Não aplicável

<sup>1</sup>Os hidrômetros tipo Woltmann são aqui considerados como velocimétricos.

Tabela 02 – Classificação de hidrômetros quanto ao princípio de funcionamento.

<b>Classes</b>	<b>Vazão Nominal Qn<sup>2</sup> (m<sup>3</sup>/h)</b>										
	<b>0,60</b>	<b>0,75</b>	<b>1,00</b>	<b>1,50</b>	<b>2,50</b>	<b>3,50</b>	<b>5,00</b>	<b>6,00</b>	<b>10,00</b>	<b>15,00</b>	
A	Q <sub>min</sub> <sup>1</sup> (m <sup>3</sup> /h)	0,024	0,030	0,040	0,040	0,100	0,140	0,200	0,240	0,400	0,600
	Q <sub>i</sub> <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> /h)	0,060	0,075	0,100	0,150	0,250	0,350	0,500	0,600	1,000	1,500
B	Q <sub>min</sub> <sup>1</sup> (m <sup>3</sup> /h)	0,012	0,015	0,020	0,030	0,050	0,070	0,100	0,120	0,200	0,300

	$Q_t^3$ (m <sup>3</sup> /h)	0,048	0,060	0,080	0,120	0,200	0,280	0,400	0,480	0,800	1,200
C	$Q_{min}^1$ (m <sup>3</sup> /h)	0,006	0,0075	0,010	0,015	0,025	0,035	0,050	0,060	0,100	0,150
	$Q_t^3$ (m <sup>3</sup> /h)	0,009	0,0110	0,015	0,0225	0,0375	0,0525	0,075	0,090	0,150	0,225

<sup>1</sup> é a vazão mínima: menor vazão na qual o medidor deve funcionar dentro do erro admissível.

<sup>2</sup> é a vazão nominal: vazão para a qual os hidrômetros são fabricados.

<sup>3</sup> é a vazão de transição: vazão que divide a faixa de vazão operacional em dois campos de medição, superior e inferior, cada um caracterizado pelo seu erro admissível.

Tabela 03 – Classificação de hidrômetros quanto à classe metrológica. Fonte: portaria 295/2018 - INMETRO

Da Tabela 03 é possível inferir que a precisão da medição aumenta de acordo com a ordem alfabética da classe metrológica, sendo os hidrômetros de classe C os mais precisos. A classe metrológica D não foi considerada na tabela 3 e se refere aos hidrômetros volumétricos, pouco representativos no parque de hidrômetros de Brasília, dada sua anterior vulnerabilidade e possibilidade de travamento, que podem significar interrupção do fornecimento e redução de volumes faturados.

Os erros de medição dos hidrômetros a serem observados experimentalmente, devem obedecer aos limites dispostos na portaria nº 295/2018 do INMETRO e estão resumidos na Tabela 04. Os erros admissíveis variam de acordo com os campos de medição (superior e inferior), onde Q1 é a vazão mínima medida dentro do erro admissível; Q2 é a vazão de transição que está entre a vazão mínima e a vazão permanente, dividindo campo inferior e superior de medição; Q3 é a vazão permanente ou maior vazão na qual o hidrômetro deve funcionar satisfatoriamente considerando a faixa de erro admissível e; Q4 é a vazão de sobrecarga ou maior vazão de funcionamento do hidrômetro que deve ocorrer em curtos espaços de tempo sem que as medições extrapolem os erros admissíveis. Para hidrômetros em uso, são aprovados em verificação aqueles cujos erros máximos admissíveis não ultrapassem o dobro dos valores explicitados na Tabela 04.

Classe de Exatidão	Campo de Medição	Erro Admissível
1	Superior (Q entre Q2 e Q4)	1% para $T^1 < 30^\circ\text{C}$ 2% para $T^1 > 30^\circ\text{C}$
	Inferior (Q entre Q1 e Q2)	3%
2	Superior (Q entre Q2 e Q4)	2% para $T^1 < 30^\circ\text{C}$ 3% para $T^1 > 30^\circ\text{C}$
	Inferior (Q entre Q1 e Q2)	5%

<sup>1</sup> Temperatura da água.

Tabela 04 – Erros admissíveis em hidrômetros. Fonte: portaria 245/2018 – INMETRO

A equação (27) mostra a fórmula de cálculo para os erros de indicação em hidrômetros. Os erros são obtidos comparando os volumes computados pelos hidrômetros com valores apurados por instrumentos da bancada de aferição.

$$E = \frac{V_h - V_e}{V_e} \times 100 \quad (27)$$

Onde E é o erro de indicação em porcentagem, V<sub>h</sub> é o volume computado pelo hidrômetro e V<sub>e</sub> é o volume escoado, que é apurado pelos instrumentos da bancada de aferição.

### **3.3.2 Individualização da Medição de Água**

Em um contexto em que o foco é a avaliação do consumo residencial e em que a avaliação de perdas é feita em um nível condominial, outro importante conceito é o de individualização da medição, que se refere a apuração do consumo de cada uma das unidades e das áreas comuns de um condomínio, podendo ele ser residencial ou comercial, vertical ou horizontal. Em um sistema individualizado, cada unidade de consumo tem vinculada a si um hidrômetro que mede o volume de água a ela fornecido. O mesmo acontece para as áreas comuns do condomínio que, em geral, tem a si vinculada, no mínimo, um hidrômetro para computar volume de água consumido em seus pontos de consumo.

De acordo com disposto na Lei Distrital nº 3.557, de 18 de janeiro de 2005, com alterações introduzidas pela Lei nº 4.383, de 28 de julho de 2009, que 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, é obrigatória a instalação de hidrômetros individualizados para cada unidade habitacional, nas edificações verticais residenciais e de uso misto e nos condomínios residenciais do Distrito Federal. O prazo imposto pela legislação às edificações existentes se encerrou no dia 19 de janeiro de 2015, entretanto, os condomínios tinham a prerrogativa de justificar a inviabilidade técnica ou econômica da individualização. Nos mesmos dispositivos é assegurado aos condomínios o direito de optar pelo modelo de hidrometração normatizado pela concessionária, ou por

qualquer outro modelo de hidrometração em que o serviço de leitura e rateio da fatura seja feita pelo condomínio.

A Resolução ADASA nº 15, de 10 de novembro de 2011, que estabelece os procedimentos para a instalação de hidrômetros individualizados em condomínios verticais residenciais e de uso misto no DF, acrescenta que são considerados condomínios existentes aqueles que resultarem de projetos de arquitetura protocolados até 22 de agosto de 2006 nas Unidades Administrativas do DF, objetivando a aprovação ou visto de projeto. A mesma Resolução também dispõe sobre os modelos de hidrometração individualizada, quais sejam:

A. Modelo Convencional: caso em que a apuração do consumo dos hidrômetros individualizados e a emissão de faturas para cada unidade usuária será feita pelo Prestador de Serviços;

B. Modelo Alternativo: caso em que a apuração do consumo dos hidrômetros individualizados e o rateio entre as unidades será feito pelo próprio condomínio, com base na fatura do hidrômetro geral emitida pelo prestador de serviços.

Assim, no Distrito Federal, toda edificação residencial ou de uso misto, independente do modelo selecionado, deverá ter instalados: o hidrômetro geral - instalado no alimentador predial - e os hidrômetros individuais - instalados para cada uma das unidades. Adicionalmente, para o modelo convencional, a referida Resolução preconiza que é necessária instalação de, no mínimo, um hidrômetro individualizado para apuração do consumo das áreas comuns das edificações.

As regras anteriores também se aplicam aos conjuntos habitacionais compostos por prédios ou prédios e casas, nos quais as unidades são abastecidas a partir de um único reservatório compartilhado. Nestes casos, o hidrômetro geral é instalado no alimentador do reservatório compartilhado, os hidrômetros individuais instalados junto à rede condominial, a montante dos pontos de consumo de cada uma das unidades. Também é necessária instalação de, no mínimo, um hidrômetro individualizado para apuração do consumo das áreas comuns do condomínio.

É importante frisar que, no Distrito Federal, as perdas de águas em instalações individualizadas não são computadas nos cálculos feitos pela Concessionária de água. Isso acontece, pois, a diferença entre o volume medido no hidrômetro geral e a soma dos volumes medidos pelos hidrômetros individualizados é compensada na inscrição de um hidrômetro que atenda à área comum do condomínio, salvo casos em que o referido medidor não está instalado, quando a diferença é compensada na inscrição do hidrômetro geral.

### **3.3.3 Medidores de Vazão**

Os medidores de vazão são aparelhos destinados a computar a quantidade volumétrica, mássica ou gravitacional que passa através de uma seção de uma tubulação ou canal por unidade de tempo. É, portanto, dado um fluxo de um líquido qualquer, um equipamento capaz de quantificar, para determinada área e em um determinado intervalo, o volume ou massa que escoou.

De acordo com Filho e Dall'Aglio (2008), nas tubulações de água em redes de distribuição, há necessidade de instalação de medidores de vazão com finalidade de fornecer subsídios aos programas de perdas e de pesquisa de vazamentos. Segundo os autores, o medidor mais utilizado pelas concessionárias do país é o do tipo eletromagnético, seguido pelo dos tipos *Annubar* e ultrassônico, sendo este último substituto paulatino do medidor do tipo turbina.

Filho (2007) descreve cinco tipos de medidores de vazão utilizados em sistemas de água, são eles: medidores tipo Venturi, medidores tipo turbina, medidores tipo *Pitot* de integração do perfil de velocidade, medidores eletromagnéticos (subdivididos em: medidores com bobina de indução externa, medidores eletromagnéticos de inserção com um sensor e medidores eletromagnéticos de inserção com múltiplos sensores) e medidores ultrassônicos (subdivididos em: medidores de tempo de trânsito e medidores de efeito doppler).

A Figura 07, adaptada de USP (2017), resume os tipos e características dos medidores de vazão:



Figura 07 – Tipos de medidores de vazão. Adaptado de USP (2017).

Destaca-se, para o presente trabalho, os medidores ultrassônicos, que, em geral, utilizam transmissores e receptores de sinal ultrassônico e fundamentam sua medição na aferição da velocidade média de propagação do sinal em um sistema de escoamento.

Os medidores ultrassônicos podem ser subdivididos em medidores de tempo de trânsito e medidores de efeito doppler:

- **Medidores de Tempo de Trânsito:** o esquema de funcionamento deste tipo de medidor envolve a medição do tempo de deslocamento de ondas ultrassônicas entre dois sensores instalados no medidor. Os sensores emitem e recebem as ondas, calculam a velocidade nas duas direções e determinam a vazão.
- **Medidores de Efeito Doppler:** se baseiam no princípio do Efeito Doppler, que determina que frequências de ondas sonoras dependem do movimento da fonte e/ou do observador em relação à fonte. Os medidores deste tipo emitem feixes ultrassônicos a partir de um transdutor, os feixes são refletidos por partículas sólidas em suspensão ou bolhas de ar, presentes na água que escoam nas tubulações. Com a correlação entre alteração da frequência e taxas de vazão é possível obter os valores destas últimas.

### 3.3.4 Componentes do Sistema de Medição Remota

Conforme mencionado anteriormente, os sistemas de telemetria podem ser divididos em três subsistemas, quais sejam: infraestrutura de medição, rede de comunicação, e infraestrutura de tratamento e gestão dos dados, conforme Figura 08. Nesse tópico cada um deles será tratado com maior profundidade e serão especificados os equipamentos e tecnologias aplicados a cada uma das etapas.



Figura 08 - Sistema de leitura remota para apuração do consumo de água. Adaptado de Lima e Navas (2012).

O primeiro subsistema é composto pela infraestrutura de medição. Trata-se dos hidrômetros, dos equipamentos que a eles devem ser acoplados, dos aparelhos necessários armazenamento dos dados e dos necessários para sua transmissão.

Os hidrômetros devem ser do tipo equipado para leitura remota e acoplados a eles devem estar, em geral, o leitor de pulsos e o dispositivo de telemetria e telecomando, este último dotado de bateria para sua alimentação. Além dos hidrômetros, é parte da infraestrutura de medição os repetidores de sinal, que são equipamentos instalados para otimizar a transmissão/recepção dos dados, diminuindo áreas de “sombras” entre medidor e concentrador, que é o último dos componentes da infraestrutura de medição. O concentrador é o equipamento destinado a receber os sinais emitidos pelos equipamentos de medição

remota e/ou repetidores e enviá-los ao sistema de supervisão. Normalmente, a transmissão dos dados de medição dos hidrômetros para os concentradores acontece via tecnologia sem fio.

O segundo subsistema se refere à rede de comunicação. Nos sistemas de telemetria a transmissão de dados entre concentradores e servidor é feita via internet, podendo ser feita por redes de banda larga, GPRS, 3G e 4G. Na sequência está resumida cada uma dessas tecnologias:

- Rede banda larga: a definição de redes de banda larga está diretamente relacionada com a velocidade e à necessidade de cabeamento para transmissão de dados. De acordo com a União Internacional das Telecomunicações – ITU (1997), a expressão banda larga é utilizada para qualificar um serviço ou sistema que exija canais de transmissão capazes de suportar taxas maiores do que a taxa primária (5 Megabits por segundo). Todavia, no Brasil não há definição sobre a taxa de transferência mínima para redes de interne de banda larga;
- Serviços Gerais de Pacote por Rádio - GPRS: conforme Santos (2008), é uma tecnologia que permite o tráfego de dados por pacotes, viabilizando a integração entre telefonia celular e internet;
- Terceira Geração – 3G: trata de uma evolução do sistema GPRS em termos de velocidade de transmissão de dados. Nesse sentido, para separar a tecnologia 3G da tecnologia 2G, a ITU definiu níveis de desempenho para velocidade mínima de transmissão de dados em vários ambientes operacionais de rádio (Telecomunicações Móveis Internacionais - IMT-2000);
- Quarta Geração – 4G: trata de uma evolução da terceira geração em termos de velocidade de transmissão de dados. Nesse sentido, para separar a tecnologia 4G da tecnologia 4G, a ITU definiu níveis de desempenho para velocidade mínima de transmissão de dados em vários ambientes operacionais de rádio (Telecomunicações Móveis Internacionais - IMT-Avançado).

Já para comunicação interna, entre equipamentos de medição e concentradores, utiliza-se, em geral, redes sem fio com transmissão por radiofrequência. De acordo com Hitchcock

(2004), as redes desse tipo convertem sinais em ondas eletromagnéticas (na faixa de frequência entre 3 KHz a 300 GHz). A transmissão dos dados é feita por aparelhos denominados transmissores. Já a decodificação dos dados recebidos é feita por aparelhos denominados receptores. Há ainda equipamentos capazes de transmitir e decodificar sinais de ondas eletromagnéticas, são denominados transceptores.

Dentre as redes para transmissão dados, tais como *wi-fi* e *bluetooth*, destacam-se duas tipologias muito utilizadas para sistemas de telemetria, são elas: *Zigbee* e *LoRaWAN*.

- *Zigbee*: é uma solução que visa permitir a comunicação entre objetos inteligentes. É uma classificação de rede sem fio pensada para ser de baixo custo e de baixa potência, potencializando sua aplicabilidade em controles sem fio e redes de monitoramento (operam em faixas de transmissão que variam entre 800 MHz e 2,4 GHz). Zigbee Alliance (2008).
- *LoRaWAN*: é um protocolo para redes de conexão sem fio de baixa potência e área ampla – LPWA - projetado para conectar objetos inteligentes à internet em redes regionais, nacionais ou globais. Visa cumprir os principais requisitos da Internet das Coisas (IoT), tais como: comunicação bidirecional, segurança de ponta a ponta, mobilidade e serviços de localização (operam em faixas de transmissão que variam entre 430 MHz e 940 MHz). Lora Alliance (2020).

O terceiro e último subsistema das soluções para medição remota é a infraestrutura de tratamento e gestão dos dados, ou sistema supervisor. Refere-se ao sistema de informação, visualização e supervisão das variáveis medidas pelos equipamentos de medição remota, que devem ser armazenados em um sistema de gerenciamento de banco de dados.

Para Lima e Navas (2012), o sistema supervisor corresponde fisicamente aos servidores web, cujo papel é prover um banco de dados para gestão do conhecimento, construindo uma visão clara e objetiva dos elementos envolvidos. O sistema supervisor deve incluir os usuários, os dados de entrada e de saída pertinentes, e deve promover uma responsabilidade social compartilhada no que se refere ao uso sustentável dos recursos e à eficiência energética dos sistemas.

### **3.3.5 Sistemas SCADA**

É também importante salientar que em muitos sistemas o acompanhamento dos dados é realizado com emprego do “*supervisory control and data acquisition*” (SCADA), sistemas capazes de realizar o controle dos dados de uma rede de distribuição de água, de uma estação de tratamento de água ou de esgoto, de equipamentos de uma indústria, entre outros. A automação de redes com este tipo de sistema, além de controlar e armazenar os dados em tempo real, é capaz de gerar relatórios estatísticos e gerenciais, fornecendo ferramentas de controle de qualidade otimizando a operação das redes de distribuição. Todavia, os sistemas SCADA não se aplicam à medição de consumo do usuário final.

### **3.3.6 Internet das Coisas e Medição Inteligente**

O conceito de internet das coisas - IoT se refere à conexão digital de objetos, que passam a ser capazes de coletar e transmitir informações a partir da sua conexão com a internet. De maneira similar, a medição inteligente se refere à sistemas onde os medidores de água ou eletricidade podem, a partir da conexão com a internet, transmitir dados de consumo em diferentes níveis espaciais e diferentes intervalos de tempo. Pode-se afirmar, portanto, que a medição inteligente é a aplicação da IoT aos medidores projetados para apurar o consumo dos usuários

Para Sánchez et al. (2020), o surgimento da IoT permite a construção de edificações e cidades inteligentes, capazes de melhor gerenciar suas infraestruturas de água, de energia e até mesmo de mobilidade urbana. De acordo com os autores, essa nova tecnologia será capaz de transformar a operação dos sistemas de abastecimento de água.

De acordo com Monks et al. (2019), ainda que as concessionárias de água operem sistemas SCADA há muito tempo para monitorar funções críticas em suas redes, a medição inteligente em nível de usuário final é capaz aproximá-las da transformação digital e da análise de dados com auxílio da IoT.

Já para King e Gage (2017), a Internet das Coisas é um ponto de inflexão quando se trata do gerenciamento de riscos e da previsão de sinistros.

É evidente, portanto, que a implantação da medição inteligente para gerenciamento de redes de distribuição de água é matéria que demanda maior profundidade na análise, dado que esse tipo de sistema é capaz de fornecer uma grande quantidade de informações, além de possibilitar a automação de componentes da rede. Por esse motivo, estudos se dedicam a propor sistemas para gerir os dados obtidos e para compreender as suas melhores aplicações.

### **3.3.7 Benefícios da Medição Inteligente**

Cominola et al. (2020) consideram que a adoção de um sistema de medição inteligente deve ir além da simples automatização da leitura e elaboração de relatórios de volumes consumidos. Para conhecer com profundidade o consumo de água dos usuários e obter um sistema capaz de fazer a gestão comercial e da operação, é também necessário associar à automação alguns fatores, são eles: tecnologia da informação, ciência de dados e outras habilidades analíticas. Só a partir daí é possível integrar o usuário ao serviço e aplicar técnicas de AI para dar suporte à operação do sistema.

De maneira semelhante, Monks et al. (2019) revelam que as infraestruturas avançadas de medição, que permitem a medição automatizada de hidrômetros em intervalos pré-determinados (geralmente de hora em hora ou de 4 em 4 horas), significam a disponibilidade crescente de um grande conjunto de dados que abre o mundo de *big data* para que as concessionárias de água possam utilizar a mineração de dados a fim de entender melhor seus negócios, levando a um planejamento estratégico mais bem fundamentado, a uma estratégia de operação mais bem informada, a economia de custos, e à disponibilização de novos serviços e produtos. Um exemplo disso é a permissão dada aos usuários para que vejam diretamente seus dados, resultando na redução da quantidade de atendimentos ou em atendimentos mais eficientes.

Contudo, ainda de acordo com Monks et al. (2019), a implementação da medição automatizada do consumo de água, por si só, não traz os potenciais benefícios que a ela podem ser associados. Além de implementar, as concessionárias precisam também evoluir seus sistemas, processos e recursos, oferecendo novos serviços. Na Tabela 05, são apresentados oito requisitos necessários para possibilitar que os benefícios da medição automatizada sejam alcançados, e na sequência cada um deles é detalhado:

<b>Requisito</b>	<b>Descrição do Requisito</b>
1	Automatização das leituras usando infraestrutura de medição avançada.
2	Melhorias na previsão de demanda e receita a partir de ferramentas avançadas de análise de dados, que considerem outros dados além do consumo.
3	Estabelecimento de um sistema de alarme de vazamentos das instalações das unidades consumidoras.
4	Desenvolvimento de um portal de dados do consumidor detalhado.
5	Oferecer faturamento mensal.
6	Estabelecer balanço hídrico detalhado, podendo ser de DMC's temporários ou permanentes.
7	Estabelecer boa capacidade para análise de dados de medidores, medições e categorias de consumo.
8	Aumentar o conhecimento acerca dos consumidores e dos ativos das redes.

Tabela 05 – Requisitos para atingir os benefícios da medição automatizada.

- Requisito 1: a telemetria, ou leitura automatizada, pode ser feita de duas formas: a primeira delas é com emprego de hidrômetros equipados com contadores digitais e dispositivos de comunicação que permitem leituristas passem e colem as leituras sem necessidade de fazer a leitura visual, nesses casos a quantidade de dados obtidos é similar à obtida via leitura tradicional. Já a segunda possibilidade permite que a leitura seja automatizada e em intervalos determinados, gerando grande quantidade de informação de consumo. O primeiro requisito, portanto, refere-se a necessária automatização do processo de leitura, possibilitando a formação de um robusto banco de dados;
- Requisito 2: a combinação dos dados de consumo com outros dados - tais como: valor da tarifa, dados sociodemográficos, dados de temperatura e pluviométricos – permite que sejam feitas previsão de demanda e de faturamento mais assertivas.
- Requisito 3: um sistema de alerta de vazamentos pode ser facilmente desenvolvido a partir do grande volume de dados de consumo que é obtido de cada unidade. Algoritmos relativamente simples são capazes de notificar usuários quanto ao

consumo incomum de água, reduzindo desperdícios e aprimorando a relação entre Concessionária e usuário;

- Requisito 4: a coleta e o armazenamento de dados do usuário combinados com a criação de um sítio eletrônico ou aplicativo, podem significar uma oportunidade para fornecer aos usuários acesso ao seu consumo quase em tempo real. Assim como o requisito 3, esse tipo de serviço é capaz de reduzir desperdícios e melhorar a relação Concessionária-usuário;
- Requisito 5: em muitos países a medição do consumo de água não é mensal e, portanto, os pagamentos mensais não se baseiam no volume aferido pelos hidrômetros. Nesse contexto, a medição automatizada pode oportunizar o faturamento mensal de acordo com o volume de água consumido;
- Requisito 6: a medição automatizada é capaz de fornecer dados de consumo em intervalos que se relacionem com os dados obtidos a partir de medidores de vazão, geralmente utilizados para aferir a vazão de entrada em DMC's. Assim, é possível estabelecer o balanço hídrico em intervalos menores e identificar os volumes e percentuais de perdas de água com maior frequência;
- Requisito 7: a medição automatizada possibilita o emprego da ciência de dados, capaz de realizar a análise de grandes conjuntos de dados, usando ferramentas avançadas de estatística e de aprendizado de máquina para fornecer respostas aos problemas relacionados com a distribuição e o consumo de água;
- Requisito 8: com a medição automatizada é possível conhecer padrões de consumo dos mais variados tipos de consumidores. Além disso, é possível identificar padrões diários e sazonais. Também é possível entender como funcionam e como devem funcionar as redes de água, permitindo avaliações sobre suas especificações e dimensionamento.

A partir dos requisitos supramencionados, o trabalho de Monks et al. (2019), com base na revisão da literatura e na entrevista com especialistas, foi capaz de levantar setenta e cinco possíveis benefícios da adoção da medição digital do consumo de água. Esses benefícios estão compilados nas tabelas 06, 07 e 08 e na Figura 09, apresentadas a seguir. As tabelas 06, 07, e 08 expõem, respectivamente, os benefícios para as concessionárias de água, os benefícios para os usuários do sistema e os benefícios compartilhados entre concessionárias e usuários. A Figura 09 é um diagrama que representa, resumidamente, todos possíveis

benefícios a serem obtidos após adoção de sistemas inteligentes de medição do consumo de água.

<b>Categoria</b>	<b>Subcategoria</b>	<b>Benefício</b>	<b>Requisito</b>	
Economias em Custo Operacional	Leitura de medidores	Redução nos gastos com leituristas / faturamento	1	
		Redução nas leituras de medidores especiais	1	
		Redução nos faturamentos estimados	1	
		Redução nos custos de saúde e segurança ocupacional	1	
		Redução nos custos de transporte e redução de emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE.	1	
		Redução nos cursos de cobrança e faturamento com a emissão de faturas digitais e possível débito em conta	5	
		Melhor previsão/recuperação da receita	2	
	Gestão Financeira	Melhoria no fluxo de caixa (faturamento mensal)	5	
		Redução de erros/perdas de dados de consumo de água residencial sem receita	1	
	Custos do serviço	Redução de erros/perdas de dados de consumo de água não residencial sem receita	1	
		Redução dos incidentes e custos de indenização devido à rompimentos e vazamentos	6	
		Redução no custo de atacado da água	2	
		Redução de vazamentos de rede e dos volumes de água não faturados	6	
		Melhor gerenciamento da demanda de pico de água	2	
		Redução nos custos de adução da água (redução da emissão de GEE)	2	
		Redução do furto de água	6,7	
	Medidores	Redução dos custos trabalhistas relacionados com a detecção de vazamentos	6,7	
		Maiores prazos para substituição de hidrômetros	7	
	Tarifas	Tarifas de água mais flexíveis	2	
		Balanceamento de carga de água com cobranças diferenciadas nas demandas de pico	2,7	
		Melhoria na satisfação do usuário	3,4,5,6,8	
	Economias em Custo de Capital	Planejamento	Melhoria no planejamento de rede	2
			Adiamento da ampliação de redes	2

	Risco	Redução do prêmio de risco e dos custos do capital de giro	2
		Aumento do valor do ativo (catalogação das ligações)	8
Novos Conhecimentos	Segmentação de Usuários	Informações sobre o uso não residencial de água	7,8
		Impactos sazonal do consumo em regiões turísticas	7,8
		Compreensão das horas de consumo conforme segmentos de consumo residencial.	7
		Identificação superdimensionamento de medidores	7
		Redução de incertezas e de margem de risco	2
		Melhoria na previsão de vazões de esgoto	2
		Melhoria na previsão do consumo e na projeção de receitas	2
	Novos Algoritmos	Elaboração de curvas diurnas de consumo para os variados tipos de consumidores não residenciais	7
		Elaboração de curvas diurnas de consumo para condomínios horizontais e verticais	7
		Modelagem reversa de características domiciliares via padrão de demanda	8

Tabela 06 – Possíveis benefícios para as concessionárias de água. Adaptado de Monks et al. (2019)

<b>Categoria</b>	<b>Subcategoria</b>	<b>Benefício</b>	<b>Requisito</b>
Serviço ao Usuário	Custo de Utilização	Redução no custo para os usuários devido ao alerta de vazamentos	3
		Redução devido à conscientização do usuário.	4
		Redução devido à previsão dos valores de conta	4
		Redução devido ao faturamento mensal	5
		Redução de sinistros	3
	Propriedades Complexas/ Condomínios	Reconciliação mais célere de contas de propriedades com várias unidades de consumo	3,4
		Identificação de irregularidades nas instalações hidráulicas em propriedades complexas	3,4
	Novos Serviços	Seleção do dia de cobrança pelo usuário	5
		Registro e análise de dados de uso final para clientes não residenciais	7
	Novos Produtos	Oferta de produtos customizados	8
		Desagregação do consumo/ Uso por utensílio	7
	Segurança	Maior segurança para proprietários e moradores	1

		Monitoramento da ocupação ou vacância de imóveis	4
Novos Conhecimentos	Uso por Utensílio/Usó Final	Integração da medição inteligente com aparelhos inteligentes	7
		Impacto da eficiência de utensílios no consumo	7
	Avaliação Comparativa	Avaliação comparativa entre segmentos de usuários	8

Tabela 07 – Possíveis benefícios para os usuários de água. Adaptado de Monks et al. (2019)

<b>Categoria</b>	<b>Subcategoria</b>	<b>Benefício</b>	<b>Requisito</b>	
Interação com Usuário	Reclamações	Redução de solicitações de revisão de conta	3,4,5	
		Redução do custo referente às reclamações feitas à órgãos externos	3,4,5	
		Redução do custo referente às reclamações diretas (feitas à concessionária)	3,4,5	
		Resultados melhorados em disputas sobre faturamento	3,4,5	
	Programas de Assistência ao Usuário	Redução de perdas devido ao alto consumo	3,4,5	
		Redução do custo de assistência hidráulica	3,4,5	
	Gestão de Crédito	Redução de subsídios governamentais	3,4,5	
		Redução dos custos em casos de falta d'água	3,4,5	
	Atendimento ao Usuário	Redução do custo em disputas judiciais	3,4,5	
		Redução de atendimentos no <i>Call Center</i>	4	
			Melhoria da comunicação com o usuário	4
		Engajamento e Boa Vontade	Maior engajamento a partir do compartilhamento de informação	3,4,5
			Maior engajamento a partir dos novos produtos/serviços	4,8
			Maior reconhecimento da eficiência operacional e da gestão do capital	2,4,6
	Possibilidade de tarifas flexíveis		3,4,5,6,8	
Regulação/Controle Interno	Medição	Dimensionamento adequado de hidrômetros	7	
		Análise de falha de medidores	7	
		Detecção de falhas de medição após grandes vazamentos em redes principais.	7	
	Monitoramento	Monitoramento automatizado do atendimento à regulamentos	7	

Tabela 08 – Possíveis benefícios compartilhados(concessionárias/usuários). Adaptado de Monks et al. (2019)



Figura 09 – Diagrama de resumo dos possíveis benefícios da medição automatizada.

Finalmente, destaca-se o trabalho de Monks et al. (2020), onde se propõe, a partir opiniões de especialistas do sistema de abastecimento de água do mercado australiano, distribuições de probabilidade que podem ser utilizadas para modelar o retorno financeiro dos benefícios advindos da medição automatizada. As distribuições de probabilidade são obtidas com auxílio do software *@Risk* a partir da realização da Simulação de Monte Carlo - SMC, utilizando como referência o valor do custo de operação.

#### 4. METODOLOGIA

Nesse capítulo são apresentados os materiais, métodos e modelos utilizados para realização do trabalho, assim como uma breve síntese de área de estudo. O capítulo está dividido em seis subitens, quais sejam a área de estudo, o estudo dos benefícios da telemetria, a coleta de dados, a modelagem do consumo de água, o balanço hídrico da área de estudo e, finalmente, o desenvolvimento do sistema de alarme de vazamento e falhas da medição.

Considerando a descrição feita no item 4.1, destaca-se que o equipamento de medição de vazão, foi instalado no escopo do deste trabalho, com a finalidade de formar o DMC temporário para determinação do balanço hídrico da rede estudada.

#### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho tem como objeto de estudo o sistema de telemetria, implementado para apuração do consumo individualizado de água no condomínio da Quadra 12, do Setor Habitacional Jardins Mangueiral, localizado na Região Administrativa de São Sebastião no Distrito Federal (Figura 10).

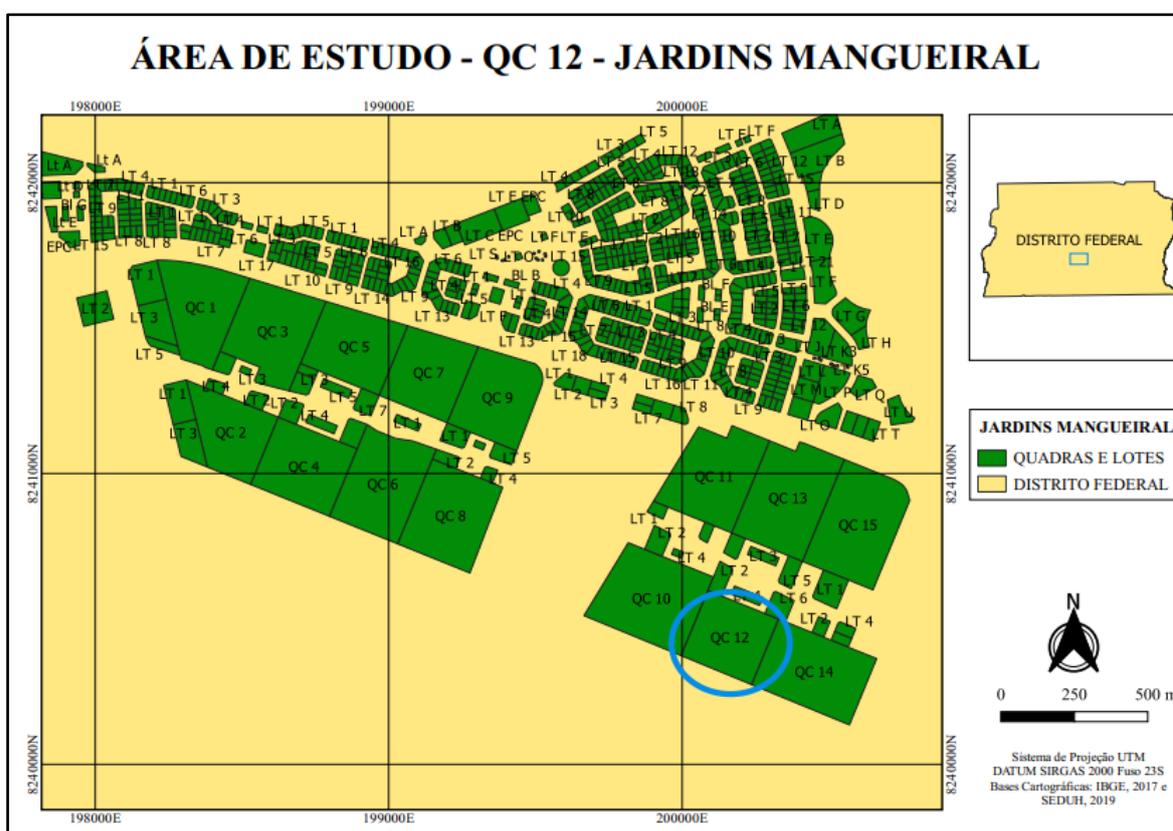


Figura 10 - Condomínio Jardim das Mangabeiras (SHJM Quadra 12).

O projeto de automatização da leitura foi executado a partir da Licitação Pública Nacional nº 018/2018, da Caesb, que resultou na assinatura do contrato nº 9023/2018 com a empresa Laager Tecnologia Sustentáveis LTDA. O contrato foi assinado com tempo de execução de 36 (trinta e seis) meses e tempo de vigência de 38 (trinta e oito) meses, com valor total de R\$ 438.486,90 (quatrocentos e trinta e oito mil reais e quatrocentos e oitenta e seis reais e

noventa centavos). O valor total engloba custos de implementação e manutenção do sistema, resultando em uma importância aproximada de R\$ 1.036,61 por unidade de consumo (423 unidades).

Os produtos e serviços prestados durante a execução do contrato envolvem, dentre outras, tarefas como: fornecimento e instalação de hidrômetros, elaboração de relatórios mensais e disponibilização dos dados de consumo em sistema supervisor. A descrição dos produtos, serviços e seus quantitativos são mostradas na Tabela 09:

<b>Item</b>	<b>Produto/Serviço</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantitativo</b>
01	Concentrador	Und.	1
02	Repetidor	Und.	5
03	Hidrômetro multijato/unijato, vazão máxima 1,5 m <sup>3</sup> /h, equipado para telemetria	Und.	423
04	Equipamento de medição remota	Und.	423
05	Equipamento de medição remota para hidrômetro geral.	Und.	1
06	Válvula de corte	Und.	423
07	Projeto executivo	Und.	1
08	Instalação e configuração de concentrador	Und.	1
09	Instalação e configuração de repetidor	Und.	5
10	Instalação e configuração de equipamento de medição remota, hidrômetros e válvulas de corte para as unidades de consumo	Und.	423
11	Instalação e configuração de equipamento de medição remota para o hidrômetro geral	Und.	1
12	Relatório mensal de disponibilidade do software do sistema de comunicação e licença de operação, baseado em relatórios semanais e diários aprovados pela Caesb.	Mês	33
13	Relatório mensal de disponibilidade do software do sistema de supervisão e licença de operação, baseado em relatórios semanais e diários aprovados pela Caesb.	Mês	33
14	Relatório mensal de manutenção, atualização e suporte: suporte técnico, manutenção de software, manutenção de equipamentos de medição remota, concentradores e repetidores.	Mês	33
15	Relatório mensal de serviço de comunicação de dados (serviço de internet por rádio ou celular, para comunicação dos equipamentos de medição remota), baseado em relatórios semanais e diários aprovados pela Caesb.	Mês	33

Tabela 09 – Serviços e produtos do Contrato de implementação da telemetria.

A prestação de serviços foi dividida em duas fases: a fase de implantação, com duração de três meses, quando o sistema foi projetado e executado; e a fase de manutenção, com duração de 33 meses, que envolve a conservação do funcionamento do sistema. Na fase de manutenção, a metodologia de medição considerou o nível médio de comunicação das unidades, dado pelo nível de disponibilidade mensal, calculado pela subtração entre um padrão inicial de 100% e o percentual referente a cada dia de falha durante o mês. O percentual de falha é o resultado da divisão do padrão inicial (100%) pelo número de dias do mês.

#### **4.1.1 Configuração Hidráulica da Rede de Distribuição da Área de Estudo**

O sistema de distribuição de água do condomínio é composto pelo seu reservatório e sua rede de distribuição, ambos internos, com responsabilidade de operação e manutenção do próprio condomínio. Para abastecimento do reservatório do condomínio há uma ligação com a rede pública. O volume de água fornecido ao empreendimento é controlado por um hidrômetro geral (macromedidor) instalado no ponto em que a ligação é feita. Importante ressaltar que a ligação e o macromedidor estão a montante da entrada do reservatório do condomínio. O esquema hidráulico da área de estudo está mostrado na Figura 11.

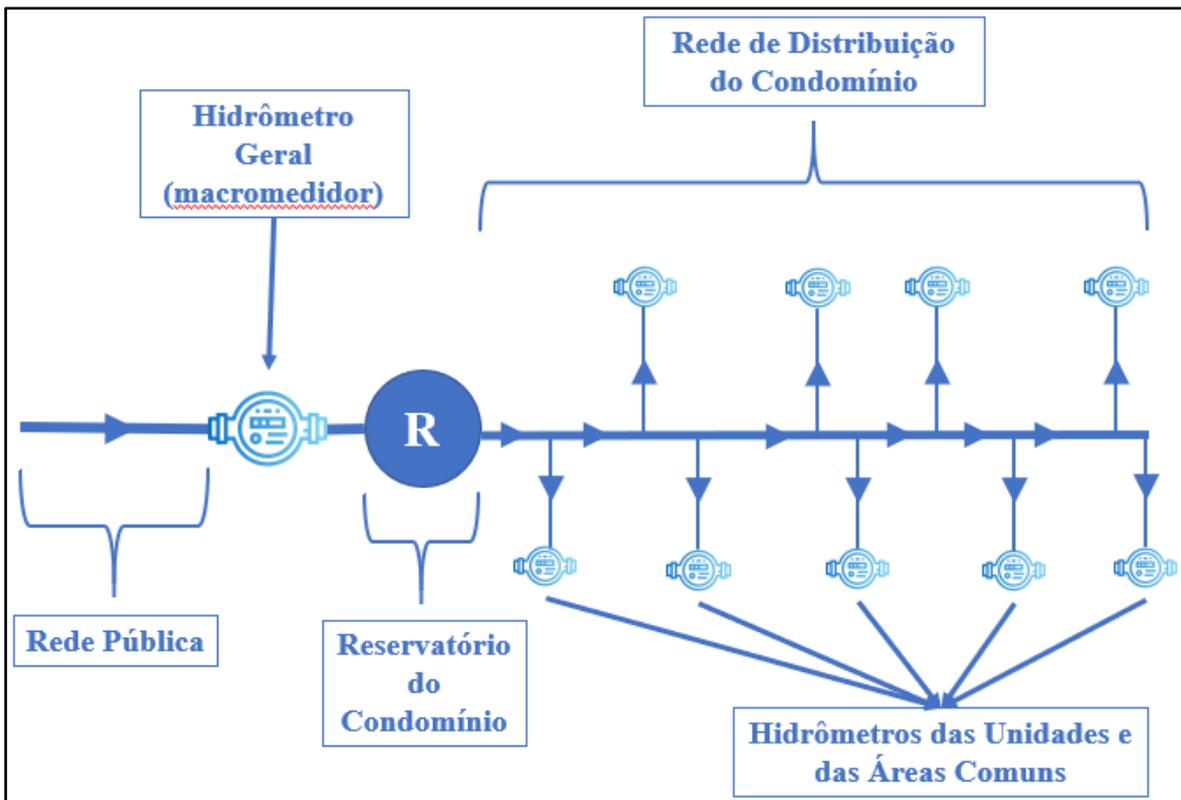


Figura 11 – Esquema de distribuição de água da área de estudo.

O reservatório de água do condomínio é do tipo castelo d'água com dois compartimentos, um inferior e outro superior, totalizado 415 m<sup>3</sup>, o que representa aproximadamente 3 vezes o consumo diário do condomínio. A alimentação do castelo ocorre de duas maneiras, a depender da pressão disponível na rede pública de distribuição:

- Quando a pressão da rede pública é suficiente, o compartimento superior é abastecido diretamente, com o controle da vazão de entrada feito por uma boia mecânica;
- Quando a pressão da rede pública é insuficiente, o compartimento inferior é alimentado, com o controle da vazão de entrada feito por uma boia mecânica. Neste caso, para alimentar o compartimento superior, há sistema de recalque, dotado de dois conjuntos motor-bomba (um de reserva), para aduzir a água do compartimento inferior ao compartimento superior. O controle da vazão de adução é feito por boia de nível elétrica, com sistema de acionamento automático.

Além do sistema de alimentação, o reservatório conta com sistema de extravasão e de limpeza, para operações de manutenção. Todos os condutos desses três sistemas são de ferro

fundido dúctil, com diâmetro de 200 mm e conexões com flanges. As fotos apresentadas nas Figuras 12, 13 e 14 mostram, além de outros detalhes, o castelo d'água e as tubulações de alimentação.



Figura 12 – Tubulações de alimentação do reservatório do condomínio.



Figura 13– Reservatório do condomínio (Castelo D'água) e tubulações a ele vinculadas.



Figura 14 – Outro detalhe do reservatório do condomínio (Castelo D'água) e tubulações a ele vinculadas.

A jusante do reservatório está a rede de distribuição do condomínio, composta por tubulação de Policloreto de Vinila - PVC, com diâmetros que variam entre 200 e 25 mm, podendo ser dividida entre rede principal e ramais de abastecimento, sendo estes últimos responsáveis por alimentar os pontos das unidades e das áreas comuns do condomínio, após apuração do consumo em hidrômetros individuais.

Os hidrômetros individualizados (Figura 15) - 420 (quatrocentos e vinte) deles instalados para contabilizar o volume de água fornecido às unidades consumidoras e outros três instalados para contabilizar o volume de água consumido nas instalações de área comum do condomínio (guarita e churrasqueiras) – são todos de Classe Metrológica B, do tipo velocimétrico do tipo monojato, com vazão máxima de 1,5 m<sup>3</sup>/h (vazão nominal de 0,75 m<sup>3</sup>/h) e pré-equipados para telemetria. Já o hidrômetro geral (Figura 16) é do tipo ultrassônico, de Classe Metrológica C, com vazão máxima de 50 m<sup>3</sup>/h (vazão permanente de 40 m<sup>3</sup>/h), também pré-equipado para leitura remota. A princípio, não existem pontos de consumo no condomínio que não estejam vinculados a algum hidrômetro individualizado.



Figura 15 – Exemplo de hidrômetro individualizado da área de estudo.



Figura 16 – Hidrômetro geral (macromedidor) da área de estudo.

Por fim se destaca o consumo médio mensal do condomínio, antes da implantação do sistema de telemetria, aproximadamente 4.400 m<sup>3</sup>. Caesb (2019).

#### 4.1.2 Configuração do Sistema de Telemetria da Área de Estudo

A solução técnica de medição automatizada, adotada para área de estudo, permite a consolidação simultânea de dados de consumo aferidos pelo macromedidor e pelos hidrômetros individuais. Também agrega funcionalidades que permitem o monitoramento do consumo das unidades ao longo do dia, bem como a interrupção remota do fornecimento, em casos necessários. Trata de um projeto piloto implementado pela Caesb com objetivo de servir de lastro para otimização dos normativos que regem o tema, bem como fundamentar o desenvolvimento de novos serviços, reduzindo perdas e estreitando os laços entre usuário e prestador de serviços.

Assim como no capítulo anterior, a apresentação do projeto implantado será dividida de acordo com os seus subsistemas: infraestrutura de medição, redes de comunicação e infraestrutura de gestão de dados ou sistema supervisor:

1. **A infraestrutura de medição:** dela fazem parte 423 hidrômetros individualizados, equipados com leitor de pulsos e módulo de radiofrequência para transmissão dos dados de leitura. Há também, para cada medidor individual, válvulas de corte, que permitem a suspensão remota do fornecimento. Um hidrômetro geral, equipado com módulo de radiofrequência para transmissão dos dados de leitura. Cinco repetidores de sinal, instalados de modo a evitar zonas sem cobertura das redes de transmissão. Um concentrador, que recebe os dados de consumo e transmite ao sistema supervisor. Na Figura 17 está apresentada esquema de montagem de um hidrômetro individual.,

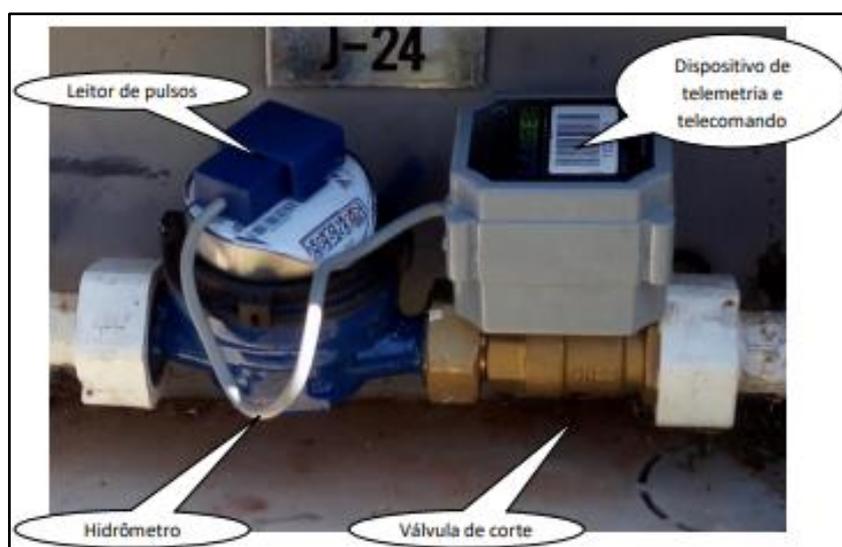


Figura 17 – Esquema de montagem dos hidrômetros das unidades/área comum.

2. **As redes de comunicação:** a comunicação entre hidrômetros individualizados e concentrador, para transmissão dos dados de leitura, é feita por rádio frequência na faixa de 915 MHz, utilizando protocolo proprietário desenvolvido pela empresa Laager Tecnologia Sustentáveis LTDA. A comunicação entre hidrômetro geral e concentrador, para transmissão dos dados de leitura, é feita via LoRaWAN, amplamente utilizada em sistemas de IoT. Finalmente, para comunicação entre concentrador e sistema supervisor, utiliza-se a rede móvel 3G.
3. **Sistema supervisor:** o sistema supervisor pode ser segmentado em dois, o primeiro deles se refere ao sistema web, desenvolvido pela empresa contratada, através do qual os dados de leitura podem ser visualizados e exportados. O segundo trata do banco de dados da Caesb, onde os dados também ficam armazenados e de onde a informação para faturamento é extraída. Na Figura 18 é apresentada uma das telas do sistema de monitoramento web.

RGI	ID do Medidor	Residência	Tipo	Bateria	Válvula	RSSI	Leitura Aferida	Retorno	Medido em
672664-1	280006189	Medidor Principal	ÁGUA-FRIA	FRACA	ABERTA	-70	67690,100	0,000	19/08/2020, 22:30:46
672664-1	280006189	Medidor Principal	ÁGUA-FRIA	FRACA	ABERTA	-74	67690,100	0,000	19/08/2020, 22:30:44
672664-1	280006189	Medidor Principal	ÁGUA-FRIA	FRACA	ABERTA	-70	67689,600	0,000	19/08/2020, 22:30:05
672664-1	280006189	Medidor Principal	ÁGUA-FRIA	FRACA	ABERTA	-73	67689,600	0,000	19/08/2020, 22:30:03
672664-1	280006189	Medidor Principal	ÁGUA-FRIA	FRACA	ABERTA	-74	67689,100	0,000	19/08/2020, 22:29:26
672664-1	280006189	Medidor Principal	ÁGUA-FRIA	FRACA	ABERTA	-69	67689,100	0,000	19/08/2020, 22:29:25

Figura 18 – Tela “Histórico de medição” do sistema de monitoramento web.

O esquema de telemetria implantado no condomínio, representado em cada um dos seus subsistemas, assim como o fluxo de informações, está representado na Figura 19, apresentada na sequência:



Figura 19 - Esquema de telemetria - Condomínio Jardim das Mangabeiras.

### 4.1.3 Instalação de Medidor de Vazão

Para formação do Distrito de Medição e Controle temporário ficou instalado, durante 5 dias (entre 27/11/2020 e 02/12/2020), um medidor de vazão na tubulação de alimentação da rede de distribuição do condomínio, em trecho junto à saída do reservatório.

O medidor instalado é do tipo ultrassônico de tempo de trânsito, modelo DigiSonic e marca Ultraflux e, desde que vinculado a um registrador de dados (para o estudo foi utilizado registrador modelo LogBox-DA, é capaz de transmitir a vazão de consumo em uma determinada frequência. Na sequência, as Figuras 20 e 21 mostram o medidor de vazão e detalhes de sua instalação, incluindo a tubulação ao qual ele ficou ligado.



Figura 20 – Medidor de vazão utilizado.

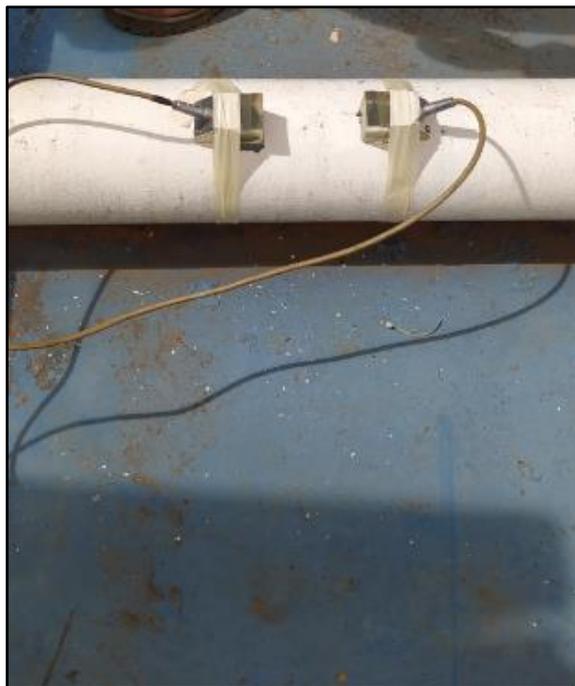


Figura 21 – Detalhe de instalação do medidor de vazão (sensores).

Durante todo o período de aquisição de dados, o conjunto medidor de vazão + registrador de dados ficou conectado a um computador portátil, instalado na casa de bombas do reservatório, protegido de contra intempéries, como se verifica na Figura 22. A transmissão de dados foi feita em tempo real e a coleta, ao final da instalação.



Figura 22 – Medidor + *data logges* + computador portátil, instalados na casa de bombas.

## 4.2 ESTUDO DOS BENEFÍCIOS DA TELEMETRIA

Para avaliar os benefícios do sistema de telemetria implantado, dois cenários foram considerados. O primeiro considera a realidade atual, isto é, os requisitos da Tabela 05 que já foram alcançados. Já o segundo cenário avalia os possíveis impactos do presente trabalho, revelando quais novos requisitos da Tabela 05 seriam alcançados e quais são os benefícios oriundos do que é proposto.

Ainda que os benefícios sejam abordados à luz do que é proposto por Monks (2019) e Monks (2020), frisa-se que a avaliação deve levar em consideração as especificidades do projeto implantado, quais sejam características da área de estudo, características dos equipamentos instalados, características de medição e faturamento, características dos dados e meios disponíveis, entre outros.

### 4.2.1 Benefícios da Telemetria Desconsiderando os Impactos do Trabalho

O método para avaliar os benefícios da implantação do sistema de medição automatizado no condomínio é aqui apresentado em duas etapas. A primeira consiste na elaboração de

classificação de possíveis benefícios (conforme Tabelas 06 a 08) oriundos apenas do requisito 01 da Tabela 05, levando em consideração as especificidades da área de estudo e do projeto estudado. Dado que os outros requisitos não foram implementados, apenas o requisito 01 é considerado neste cenário. A segunda etapa trata da estimativa da redução de custos operacionais a partir dos dados disponibilizados pela pesquisa de Monks (2020). As duas etapas são mais bem detalhadas na sequência:

- 1. Primeira etapa:** nessa parte se compara todos os benefícios apresentados pelo trabalho de Monks (2019) com os benefícios identificados no caso específico do condomínio, sem considerar os impactos deste trabalho. Como o único requisito implementado é o 01 da Tabela 05 (Automatização das leituras usando infraestrutura de medição avançada), são elaborados tabela e diagrama contendo todos os benefícios identificados que decorrem apenas da automatização das leituras usando infraestrutura de medição avançada. Ressalta-se que nenhum outro requisito é avaliado neste item.
- 2. Segunda etapa:** nessa parte, em posse dos dados referentes à pesquisa feita por Monks (2020) na Austrália, junto a especialistas da área de abastecimento de água, constrói-se a distribuição de frequências, relativa ao impacto percentual, estimado por especialistas, no custo operacional dos benefícios relacionados com o requisito 01. A distribuição representa quanto um benefício, em média, impacta na redução do custo operacional. Depois, são determinadas as reduções de custo operacional que cada um dos benefícios identificados representa. Assim, a partir da distribuição de frequências, e das reduções de custo operacional dos benefícios, é realizada uma Simulação de Monte Carlo (50.000 iterações), cujo resultado é uma curva de distribuição normal de possíveis valores de redução do custo operacional. Como referência para os cálculos se utiliza percentuais (de acordo com os benefícios apurados) do custo operacional por ligação no ano de 2019, apresentado pela Caesb em sua Demonstração Financeira - 2019. Essa avaliação tem a finalidade de mostrar qual o retorno econômico das soluções de medição remota do consumo de água, considerando apenas a instalação.

#### **4.2.2 Benefícios da Telemetria Considerando os Impactos do Trabalho**

De maneira semelhante ao item anterior, o método para avaliar os benefícios da implantação do sistema de medição automatizado no condomínio é aqui apresentado em duas etapas. A primeira consiste na elaboração de classificação de possíveis benefícios (conforme Tabelas 06 a 08) oriundos dos requisitos 01, 03 e 06 da Tabela 05. São aqui também levadas em consideração as especificidades da área de estudo e do projeto estudado. Dado que os requisitos 03 e 06 são desenvolvidos durante este trabalho, eles se juntam ao requisito 01 no segundo cenário. A segunda etapa trata da estimativa da redução de custos operacionais a partir dos dados disponibilizados pela pesquisa de Monks (2020). As duas etapas são mais bem detalhadas na sequência:

- 1. Primeira etapa:** nessa parte se compara todos os benefícios apresentados pelo trabalho de Monks (2019) com os benefícios identificados no caso específico do condomínio, considerando os impactos deste trabalho. Portanto, além do requisito 01 (Automatização das leituras usando infraestrutura de medição avançada), são também considerados como implementados os requisitos 03 e 06 da Tabela 05 (Estabelecimento de um sistema de alarme de vazamentos e estabelecer balanço hídrico detalhado, podendo ser de DMC's temporários ou permanentes). Com essa abordagem são elaborados são elaborados tabela e diagrama contendo todos os benefícios identificados que decorrem da automatização das leituras com infraestrutura de medição avançada, do estabelecimento de um sistema de alarme de vazamentos e do estabelecimento de um balanço hídrico detalhado com formação de um DMC.
- 2. Segunda etapa:** em posse dos dados referentes à pesquisa feita por Monks (2020) junto a especialistas da área de abastecimento de água, na Austrália, constrói-se a distribuição de frequências, relativa ao impacto percentual no custo operacional dos benefícios relacionados com os requisitos 01, 03 e 06. A distribuição representa quanto um benefício, em média, impacta na redução do custo operacional. Depois, são determinadas as reduções de custo operacional que cada um dos benefícios identificados representa. Assim, a partir da distribuição de frequências, é realizada uma Simulação de Monte Carlo (50.000 iterações), cujo resultado é uma curva de distribuição normal de possíveis valores de redução do custo operacional. Como no cenário 01, também foi utilizada como referência para os cálculos percentuais (de acordo com os benefícios apurados) do custo operacional por ligação no ano de 2019, apresentado pela Caesb em sua Demonstração Financeira - 2019. Essa avaliação tem

a finalidade de mostrar qual o retorno econômico das soluções de medição remota do consumo de água, considerando a instalação e outras ferramentas de gestão dos dados obtidos.

Salienta-se que o requisito 05 – Oferecer faturamento mensal – já é uma realidade no sistema de faturamento das empresas de saneamento básico do Brasil, portanto, no contexto nacional, os benefícios oriundos desse requisito não se relacionam com a implementação da medição automatizada e não foram considerados nos estudos dos benefícios da telemetria.

Também, a título comparativo, foram obtidos os faturamentos médios anterior e posterior à implementação do sistema de medição automatizada.

### **4.3 COLETA DE DADOS**

Os dados disponíveis se relacionam com a possibilidade de realizar acompanhamento do consumo em frequência muito mais alta, devido ao fato de terem sido instalados no condomínio medidores equipados com leitura remota capazes de transmitir os dados de volume apurados em tempos inferiores ao consumo diário e mensal. Estão disponíveis os dados de consumo das 420 unidades residenciais, de outros 03 hidrômetros individualizados, instalados para apuração do consumo das áreas comuns do condomínio e do macromedidor.

Além dos dados de consumo referentes ao sistema de telemetria, a instalação de um medidor de vazão forneceu dados de vazão de entrada no DMC temporariamente formado para a área de estudo. Como informado anteriormente, o equipamento ficou instalado durante aproximadamente 5 dias (entre 09h41min de 27/11/2020 e 14h49min de 02/12/2020)

#### **4.3.1 Dados da Medição de Vazão**

Os dados referentes à medição de vazão, realizada na tubulação de consumo, a jusante do reservatório que abastece a rede de abastecimento do condomínio estudado, foram transmitidos, a partir da instalação de um medidor de vazão ultrassônico e de um registrador de dados junto a ele. A transmissão para o computador portátil, que também ficou instalado

no condomínio, ocorreu em tempo real e a coleta de dados se deu ao final do período de medição, com uso do software *LogChart II*.

A utilização do software permitiu, além da elaboração de gráficos para visualização do comportamento do consumo durante o tempo, a exportação dos dados para planilhas eletrônicas em formato *.xls* ou *.csv*.

A frequência de transmissão de dados foi de dois minutos, totalizando 3.755 aquisições de vazão instantânea para o período de medição. Não houve alarmes de mau funcionamento do equipamento ou dados faltantes.

#### **4.3.2 Dados de Telemetria**

De acordo com regras da já mencionada Licitação Pública Nacional – LPN - nº 018/2018, da Caesb, a frequência mínima de transmissão dos dados de medição automatizada deve ser conforme Tabela 10. A coluna “Frequência Prática” se refere a real frequência de transmissão dos dados.

<b>Hidrômetro</b>	<b>Frequência Mínima</b>	<b>Frequência Prática</b>
Macromedidor	A cada quatro horas	Horária
Unidades	A cada quatro horas	A cada quatro horas
Áreas Comuns	A cada quatro horas	A cada quatro horas

Tabela 10 – Frequência de transmissão dos dados de telemetria

Para o trabalho, a coleta dos dados de telemetria foi feita junto ao sistema web, desenvolvido pela empresa contratada para implementar a infraestrutura de telemetria no condomínio. O sistema permite a exportação dos dados para planilhas eletrônicas em formato *.xls* ou *.csv*.

A princípio, deveriam ser gerados por dia no condomínio, aproximadamente 2.544 dados de leitura, seis para cada um dos 424 hidrômetros equipados com medição automatizada. Contudo, para alguns medidores, a transmissão dos dados foi problemática durante períodos de medição.

Visando elaborar o balanço hídrico do sistema de abastecimento da área de estudo, foram coletados todos os dados de leitura, posteriormente transformados em dados de consumo, dos hidrômetros das unidades e das áreas comuns para o período no qual o medidor de vazão ficou instalado (27/11/2020 a 02/12/2020). Para o mesmo intervalo de tempo, também foram coletadas as leituras do macromedidor, com objetivo de fazer uma comparação entre consumo apurado pelo hidrômetro geral e pelo medidor de vazão. Mais uma vez, destaca-se que o macromedidor está instalado a montante do reservatório do condomínio, enquanto o medidor de vazão foi instalado a jusante do castelo d'água.

Já para modelagem do consumo das unidades, das áreas comuns e do condomínio, foram obtidas as leituras relativas a um período de um ano (entre 00h00min de 01/01/2020 e 23:59min de 31/12/2020). Não foram coletados os dados de todos os 423 hidrômetros individuais, visto que houve necessidade de fazer o tratamento manual dos dados, o que reduziu a capacidade de processamento. Além do hidrômetro geral e dos de área comum, foi selecionada uma amostra de medidores, contendo no mínimo dois para cada tipo de planta arquitetônica das unidades e considerando aqueles com maior quantidade de dados disponíveis. Os consumos foram calculados conforme menor intervalo entre dados (aproximadamente 4h para os hidrômetros individualizados e 1h para o hidrômetro geral). A Tabela 11, apresentada a seguir, ilustra os dados de leitura e consumo obtidos para uma das unidades do condomínio em 30/10/2020:

<b>Leitura (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Consumo (litros)</b>	<b>Data de Medição</b>	<b>Hora de Medição</b>
246,319	11	30/10/2020	03:43
246,328	9	30/10/2020	07:54
246,500	172	30/10/2020	10:40
246,509	9	30/10/2020	11:49
246,625	116	30/10/2020	15:53
246,698	73	30/10/2020	19:55
246,852	154	30/10/2020	23:49
<b>TOTAL:</b>	<b>544</b>		

Tabela 11 - Consumo diário de uma unidade habitacional do condomínio (dia 30/10/2020).

### **4.3.3 Séries Temporais de Consumo**

Os dados de consumo a serem modelados, obtidos a partir das leituras dos hidrômetros da amostra mencionada no item anterior, foram organizados em séries temporais. Para os hidrômetros individualizados (unidades e áreas comuns) as séries foram organizadas em dados de vazão referentes a intervalos uniformes de quatro horas (intervalo mais frequente na amostra). Para isso, os minutos foram arredondados e os períodos entre leituras inferiores a quatro horas foram desconsiderados no cálculo da vazão de consumo. Quanto ao macromedidor, o intervalo entre leituras considerado foi de uma hora. Isto porque, apesar da frequência mínima entre leituras ser de quatro horas, constatou-se que o intervalo mais frequente na amostra foi de uma hora.

Os dados da medição de vazão também foram organizados em forma de série temporal, utilizando como intervalo uniforme os dois minutos entre registros, conforme anteriormente apresentado.

Todas as séries temporais foram concatenadas no software estatístico *Rstudio*, após importação das vazões de consumo, obtidas a partir dos dados de leitura (posteriormente tratados) dos medidores, exportados do sistema web para planilhas em formato *.xls* e *.csv*. O trabalho para obtenção das séries temporais incluiu o tratamento dos dados, com utilização de técnicas para substituir dados ausentes. Os dados que tratavam de pontos fora da curva foram também substituídos para modelagem.

## **4.4 MODELAGEM DO CONSUMO DE ÁGUA**

Com base na fundamentação teórica e nos dados de medição coletados, foram construídos modelos que possam representar o consumo de água do condomínio. São três categorias que os modelos pretendem simular: o consumo do condomínio como um todo, o consumo exclusivamente dos pontos de área comum, e o consumo de algumas das unidades residenciais.

Para tanto, foram utilizados três modelos, quais sejam o modelo ARIMA, o modelo SARIMA e a regressão linear múltipla multivariada. Todos a serem abordados nos subitens

a seguir. A modelagem tem objetivo de permitir a utilização dos dados de telemetria para construção de ferramenta que auxilie a operação e o dimensionamento de redes de água de características semelhantes às do condomínio.

#### **4.4.1 Modelo ARIMA**

Partindo das séries temporais de consumo, organizadas para cada um dos hidrômetros da amostra selecionada (em consonância com o item 4.3.2), o consumo foi modelado utilizando como fundamento as séries temporais de vazão de consumo, obtidas para cada um dos hidrômetros considerados na amostragem. Todos os modelos foram simulados com utilização do software *Rstudio*. O passo a passo para a determinação dos valores dos parâmetros (p,d,q), explicitados no Capítulo 3, é descrito a seguir:

1. Divisão da base de dados em base de treino (80% do total) e base de teste (20% do total);
2. Aplicação do teste de *Dickey-Fuller* para verificação da estacionariedade da série temporal e seleção do parâmetro relativo a essa propriedade;
3. Teste gráfico da autocorrelação e da autocorrelação parcial para seleção dos parâmetros de autorregressão e de médias móveis;
4. Simulação do modelo ARIMA;
5. Verificação do AIC – que é utilizado para avaliar a performance do modelo;
6. Checagem dos resíduos da simulação, onde se verifica o teste gráfico da autocorrelação dos resíduos, assim como sua normalidade (aderência à função normal de probabilidade);
7. Nova seleção dos parâmetros de autorregressão e de média móveis e nova simulação do modelo, com a comparação entre os resultados do AIC e da checagem de resíduos até que não se obtenha melhores resultados;
8. As equações obtidas foram testadas no conjunto de dados de consumo. Para o teste, foram obtidos, também com o *RStudio*, os valores do MAE e da RMSE – (equações 14 e 16).

#### **4.4.2 Modelo SARIMA**

Assim como no caso anterior, o modelo utilizou como fundamento as séries temporais de vazão de consumo, obtidas para cada um dos hidrômetros considerados na amostragem. Todos os modelos foram simulados com utilização do software *Rstudio*, todavia, neste modelo foi utilizada a sazonalidade de seis, representando a média de seis leituras diárias. O passo a passo para a determinação dos valores dos parâmetros  $p, d$  e  $q$ , assim como os parâmetros  $P, D, Q$  e  $s$ , todos explicitados no Capítulo 3, é descrito a seguir:

1. Divisão da base de dados em base de treino (80% do total) e base de teste (20% do total);
2. Aplicação do teste de *Dickey-Fuller* para verificação da estacionariedade da série temporal e seleção do parâmetro relativo a essa propriedade;
3. Teste gráfico da autocorrelação e da autocorrelação parcial para seleção dos parâmetros de autorregressão e de médias móveis, assim como dos parâmetros de autorregressão sazonal e médias móveis sazonais;
4. Simulação do modelo ARIMA;
5. Verificação do AIC – que é utilizado para avaliar a performance do modelo;
6. Checagem dos resíduos da simulação, onde se verifica o teste gráfico da autocorrelação dos resíduos, assim como sua normalidade (aderência à função normal de probabilidade);
7. Nova seleção dos parâmetros de autorregressão e de média móveis (não sazonais e sazonais) e nova simulação do modelo, com a comparação entre os resultados do AIC e da checagem de resíduos até que não se obtenha melhores resultados;
8. As equações obtidas foram testadas no conjunto de dados de consumo. Para o teste, foram obtidos, também com o *RStudio*, os valores do MAE e da RMSE – (equações 14 e 16).

#### **4.4.3 Regressão Linear Multivariada**

Diferentemente dos outros dois modelos, a Regressão Linear Multivariada utilizou dados complementares (variáveis explicativas), não se limitando à análise da série temporal de vazões de consumo. Para isso, alguns procedimentos foram adotados, dentre os quais se destaca a necessidade de encontrar possível relação entre variáveis. Assim, a determinação de um modelo, que resultou em uma equação com coeficientes representando o impacto de cada uma das variáveis explicativas, seguiu as seguintes fases:

1. A partir dos dados de leitura coletados, para todos os hidrômetros da amostra, foram obtidas e organizadas em um banco de dados outras variáveis além das vazões de consumo, são elas: o intervalo do dia para quando o consumo foi computado (6 intervalos de 4 horas), a vazão de consumo média, de acordo com a hora, a vazão de consumo no intervalo anterior e as vazões de consumo para mesma hora de dias anteriores. A Tabela 12 a seguir mostra um recorte do quadro de dados desenvolvido (para os intervalos de consumo foram utilizadas variáveis “dummy” para processamento das regressões):

<b>Vazão</b> <b>(l/h)</b>	<b>Vazão t-1</b> <b>(l/h)</b>	<b>Vazão d-1</b> <b>(l/h)</b>	<b>Média</b> <b>(l/h)</b>	<b>Intervalo</b> <b>(1-6)</b>
45,25	5,00	30,25	3,00	2
29,00	45,25	40,50	67,25	3
18,25	29,00	25,00	35,75	4

Tabela 12 – Modelo do banco de dados para regressão linear multivariada.

2. Após compilação dos dados, foi analisada a correlação entre variáveis a fim de definir quais delas seriam significativas para o modelo de regressão linear multivariada. Para isso, calculou-se a matriz de correlação com os valores do coeficiente de *Pearson*, capaz de avaliar a probabilidade de correlação linear entre variáveis. Utilizou-se o software *RStudio* para o desenvolvimento das matrizes;
3. Com as combinações de variáveis que impactam na vazão de consumo selecionadas, foram processadas, também com auxílio do software *RStudio*, as regressões lineares multivariadas a fim de obter a parametrização estatística de uma equação que descrevesse a relação entre variáveis explicativas e a vazão de consumo;
4. Foram avaliados os resultados e o melhor modelo foi selecionado a partir da avaliação dos valores de AIC e de RSE (equação 16).

#### 4.5 BALANÇO HÍDRICO DA ÁREA DE ESTUDO

Como já mencionado anteriormente, a realização do balanço hídrico para área de estudo envolveu a instalação de medidor de vazão para formação do Distrito de Medição e Controle. A instalação do medidor possibilitou medir a vazão de entrada no condomínio enquanto o

sistema de telemetria implantado viabilizou a medição das vazões de consumo. Com isso, utilizando o método proposto por Mazzolani et al (2016), foi possível estimar as perdas reais na rede de distribuição de água do condomínio, e conseqüentemente, calcular os índices de perda.

Neste item são detalhados aspectos sobre a formação do DMC temporário, sobre o método para determinação das perdas reais no condomínio e, por último, sobre os cálculos realizados para obtenção dos indicadores de perda na rede de distribuição estudada.

É também importante ressaltar que, apesar da instalação do medidor de vazão ter sido fundamental para possibilitar a estimativa do balanço hídrico do condomínio, algumas dificuldades, como o curto período no qual o medidor ficou instalado, por razões de segurança e pela necessária utilização do equipamento em outras demandas, devem ser levadas em consideração.

#### **4.5.1 Determinação do Consumo do Condomínio**

Durante o período em que o medidor de vazão ficou instalado, foram determinados os consumos diários das unidades e das áreas comuns do condomínio. Com isso, foi possível também determinar o consumo diário global do condomínio, a ser comparado com os dados de vazão de entrada.

Cada hidrômetro individual (unidades e área comum), quando funcionando normalmente, envia no mínimo uma leitura a cada quatro horas. Todavia, os horários de envio são desencontrados, o que dificulta a determinação das vazões de consumo em frequência inferior a diária. Por exemplo: enquanto um hidrômetro envia leituras as 00h00min, 04h00min, 08h00min, 12h00min, 16h00min e 20h00min, outro medidor envia leituras as 02h00min, 06h00min, 10h00min, 14h00min, 18h00min e 22h00min, e assim sucessivamente.

Assim, entre 28/11/2020 e 01/12/2020, foram obtidos os volumes de consumo diário para os hidrômetros das 420 unidades e para os três hidrômetros que abastecem as áreas comuns. Da somatória destes volumes resultou o volume diário de consumo global do condomínio.

Destaca-se que os dias 27/11/2020 e 02/12/2020 não foram considerados para os cálculos, dado que o medidor de vazão ficou instalado em período inferior a 24 horas, o que inviabiliza os cálculos de consumo para o mesmo período, como explicado anteriormente.

Para falhas que resultaram na ausência de dados de leitura, isto é, para hidrômetros cujo sistema de medição automatizada falhou no período, foi considerada a média do consumo diário fundamentada pelo consumo médio mensal da própria unidade. Na sequência, a Tabela 13 mostra um recorte do modelo de banco de dados de consumo diário dos hidrômetros do condomínio

<b>Dia</b>	<b>Consumo (l)</b>				
	<b>Unidade 01</b>	<b>Unidade 02</b>	<b>Unidade 03</b>	<b>Unidade 04</b>	<b>Unidade 05</b>
28/11/2020	878	1390	258	465	991
29/11/2020	988	1114	296	470	966
30/11/2020	449	1181	356	551	922
01/12/2020	777	1259	444	481	888

Tabela 13 – Modelo do banco de dados para consumo diário dos hidrômetros individuais.

Também, a fim de verificar os impactos do abastecimento do reservatório, foi comparado o consumo horário computado pelo hidrômetro geral (conforme frequência da Tabela 10) com o consumo aferido pelo medidor de vazão. Com a comparação é possível otimizar operações de manutenção para que não ocorra desabastecimento no condomínio.

#### **4.5.2 Estimativa das Perdas Reais**

Neste item, a partir do método apresentado por Mazzolani et al (2016), apresenta-se o que foi feito neste trabalho para estimativa das perdas reais na área de estudo. O que também só possível após formação do DMC temporário.

Inicialmente, foi feita a modelagem e algumas simulações da rede de abastecimento do condomínio com auxílio do software EPANET (as propriedades e dimensões da rede foram obtidas em consulta ao projeto executivo). As simulações objetivaram identificar as pressões mínimas e máximas na rede, em função da variação da demanda. Isto foi feito para verificar

se a variação de pressão na rede pode ser de fato desconsiderada, conforme suposições do modelo proposto.

Para o período estudado foram feitas simulações com a vazão máxima e com a vazão mínima de entrada no condomínio, daí resultou a comparação entre pressões mínimas e máximas. Visando simplificar as simulações, as demandas nos nós da rede foram consideradas proporcionais às vazões de projeto e são resultado do quociente entre vazão de entrada e número de nós multiplicado pela proporção da vazão de projeto.

Verificada a pressão, foram determinados, após consulta aos dados de medição da vazão de entrada, o volume médio noturno e o volume médio diário de água que entrou no sistema. Com estes dados, o sistema não linear (20) foi solucionado, e o coeficiente K, assim como o valor médio do volume de vazamentos na rede e conseqüentemente o seu percentual de perdas reais, foram determinados.

Importante frisar que a aplicação do método, tal qual foi feita neste trabalho, depende da ausência de variações consideráveis de pressão na rede durante as medições de vazão de entrada (o que é o caso de redes superdimensionadas ou com elevado volume destinado ao combate a incêndio). Todavia, é possível também estimar perdas reais a partir deste método quando há variações consideráveis de pressão, sendo necessário adicionar às formulações um termo dependente da relação entre pressões médias diárias e pressões médias noturnas.

As perdas reais também foram estimadas pelo método da vazão mínima noturna (MNF), subtraindo o consumo mínimo noturno da vazão mínima constatada no período de análise. O consumo mínimo noturno foi calculado de acordo com o que dispõe a Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento - AESBE (2015), considerando consumo mínimo de 0,34 litros por habitante por noite mais 0,50 litros por ramal pressurizado, referente a perdas em instalações internas.

Para a realização do Balanço Hídrico e estimativa dos indicadores de perda, utilizou-se, de maneira conservadora, o maior valor encontrado entre os dois

### 4.5.3 Estimativa dos Indicadores de Perda

Com os volumes de consumo diário do condomínio e após estimar as perdas reais da rede, foi montado o balanço hídrico do condomínio, a partir do qual foram estimados os índices de perda abordados no referencial teórico.

Inicialmente, calculou-se o Índice de Perdas na Distribuição (equação 22), desconsiderando os volumes importados e de serviço, já que não se verificam no caso de estudo. Adotou-se como volume produzido aquele de entrada na rede do condomínio (calculado com os dados do medidor de vazão) e como volume consumido se adotou o somatório dos volumes apurados pelas leituras dos hidrômetros individuais, que incluem o consumo das áreas comuns. O cálculo foi feito para o período em que foi possível obter os consumos diários do medidor de vazão (entre 28/11/2020 e 01/12/2020). Com o cálculo, as perdas aparentes foram estimadas, subtraindo as perdas reais do índice de perdas (conforme item 4.5.2).

Com as mesmas suposições feitas para o cálculo do Índice de Perdas na Distribuição, também foi calculado o Índice de Perdas por Ligação (equação 23). Para a quantidade de ligações foi considerado o número unidades de consumo do condomínio (423).

Finalmente, foram calculados o Índice de Vazamentos da Infraestrutura e o Índice de Perdas Aparentes. Os cálculos utilizaram o volume de perda real estimado e o valor de perda aparente estimado, este último após balanço hídrico do condomínio. Para o cálculo do índice de Vazamentos da Infraestrutura foi também necessário adotar um valor para o volume de perdas reais inevitáveis. Utilizou-se, de acordo com o que propõe a IWA para redes com boa performance (poucos vazamentos e boa capacidade de manutenção), 18 litros por quilômetro vezes pressão média da rede, 0,8 litros por ramal vezes pressão média da rede, e 25 litros por quilômetro de ramal pressurizado (entre rede principal e hidrômetro) vezes pressão média da rede (a pressão média da rede para os cálculos foi a obtida nas simulações realizadas como disposto no item 4.5.2).

É importante ressaltar que a utilização do IVI pode ser inadequada para avaliação da rede do condomínio, em função da reduzida quantidade e da baixa densidade de ligações, todavia, ante ausência de indicadores mais representativos, ele foi utilizado.

## **4.6 SISTEMA DE ALARME DE VAZAMENTOS E FALHAS NA MEDIÇÃO**

Nesta parte do trabalho foi desenvolvido um painel de controle, fundamentado pelos dados de volume e vazão de consumo das unidades, contendo: a) informações da evolução do consumo das unidades e sua média móvel; b) uma comparação dos conjuntos de dados de consumo de água em períodos diferentes para a mesma unidade, e, por fim; c) um indicador do consumo, indicando se o consumo da unidade está dentro dos padrões pré-estabelecidos ou se há necessidade de fazer algum tipo de investigação mais criteriosa quanto à possíveis vazamentos ou problemas de medição.

O painel foi desenvolvido com a ferramenta gratuita “*Data Studio*”, com os dados exportados da base desenvolvida (formato “.xls”).

Os subitens da sequência detalham o método utilizado para construção de cada um dos conteúdos do painel de controle.

### **4.6.1 Evolução do Consumo e Média Móvel**

Para construção desta parte do painel, foram utilizados os volumes consumidos pelas unidades em um intervalo quatro horas (vazão de consumo), conforme frequência mínima de transmissão de leituras (ver Tabela 10). O banco de dados utilizado é o mesmo utilizado para a modelagem do consumo com regressão linear multivariada (Tabela 12).

Foi acrescido ao banco de dados uma coluna, para obtenção da média móvel dos volumes consumidos. Utilizou-se a média móvel de sete dias (168 horas ou 42 intervalos de quatro horas) com intuito de representar a evolução semanal do consumo, levando em consideração a sazonalidade do consumo diário para os diferentes dias da semana.

No painel de controle são apresentados os gráficos de evolução do consumo e da sua média móvel, permitindo a seleção de períodos específicos e unidades específicas.

#### 4.6.2 Comparação dos Consumos em Períodos Diferentes

A comparação utilizada e apresentada no painel de controle é feita com o método sugerido por van Thienen (2013), abordado com maior detalhe no referencial teórico. Trata da comparação entre dois períodos de consumo feito com dados de vazão.

A base de dados utilizada nesta etapa é a mesma do item 4.6.1 acrescido das colunas de para os coeficientes “a” e “b” da equação de reta ajustada. O período escolhido para aplicação do método é também sete dias, ou seja, compara-se o consumo da semana atual (vazões de quatro em quatro horas, totalizando 42 dados) com o consumo da semana anterior.

Esta parte do painel é apresentada com a exibição dos gráficos de melhores ajustes para os coeficientes “a” (declividade) e “b” (interseção) na equação de reta ajustada, que representam respectivamente variações consistentes e inconsistentes no consumo da unidade estudada. Os filtros de exibição permitem selecionar unidades e períodos específicos.

#### 4.6.3 Indicador de Consumo

O indicador apresentado no painel de controle considera as informações disponibilizadas tanto pelo acompanhamento da evolução do consumo (item 4.6.1) quanto pela comparação entre consumos (item 4.6.2), classificando o comportamento da demanda em três grupos: abaixo do esperado, normal, e acima do esperado.

Como parâmetro para a classificação foi utilizado o critério para reter a fatura do usuário, previsto na Resolução ADASA nº 14/2011, a partir de estudo estatístico da variação do consumo (Nível de confiança de 80% para imóveis com consumo mensal médio de até 40 m<sup>3</sup>, caso da amostra selecionada). A Tabela 14, na sequência, mostra os critérios para classificação do indicador em cada um dos três grupos propostos:

Indicador	Soma	Classificação	Parâmetros					
			Média Móvel	Peso	Coeficiente “a”	Peso	Coeficiente “b”	Peso

-1	< -1	Abaixo do esperado	Varição < -80%	-1	< 0,20	-1	< - $\sigma^1$	-1
0	-1 até 1	Normal	Varição entre -80 e 80%	0	Entre 0,20 e 1,80	0	Entre - $\sigma$ e $\sigma$	0
1	> 1	Acima do esperado	Varição > 80%	1	> 1,80	1	> $\sigma$	1

<sup>1</sup> Desvio padrão da vazão de consumo referente à série temporal do hidrômetro da unidade.

Tabela 14 – Critérios de classificação do indicador.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ESTUDO DOS BENEFÍCIOS DA TELEMETRIA

São apresentados neste item os resultados do que foi proposto no item 4.2. Especificamente, são apresentadas, no item 5.1.1, as tabelas e diagramas que dizem respeito à uma avaliação dos benefícios oriundos da implantação da leitura automatizada, com fundamento no que propõe o estudo de Monks et al. (2019), sem levar em consideração os possíveis impactos do presente trabalho. Também são mostradas as distribuições de frequência, que se referem a um recorte da pesquisa qualitativa feita por Monks et al. (2020) aplicado ao caso de estudo, e os resultados da Simulação de Monte Carlo, feita a partir da distribuição de frequências com 50.000 iterações. Isto é feito também no item 5.1.2, contudo, neste caso, considera-se os possíveis impactos do presente trabalho.

#### 5.1.1 Benefícios da Telemetria Desconsiderando Impactos do Trabalho – Cenário 01

Em análise, diante das especificidades da área de estudo, foi desenvolvida a Tabela 15 e o diagrama da Figura 23, reproduzidos na sequência, onde são expostos os benefícios da medição automatizada para o caso avaliado, considerando apenas a sua implantação neste cenário 01, isto é, o Requisito 01 da Tabela 05.

<b>Categoria</b>	<b>Subcategoria</b>	<b>Benefício</b>	<b>Código</b>
	Leitura de medidores	Redução nos gastos com leituristas / faturamento	A
		Redução nos faturamentos estimados	B

Economias em Custo Operacional		Redução nos custos de saúde e segurança ocupacional	C
		Redução nos custos de transporte e redução de emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE.	D
	Gestão Financeira	Redução de erros/perdas de dados de consumo de água residencial sem receita	E
Serviço ao Usuário	Segurança	Maior segurança para proprietários e moradores	F

Tabela 15 – Benefícios da telemetria desconsiderando o trabalho (cenário 01).

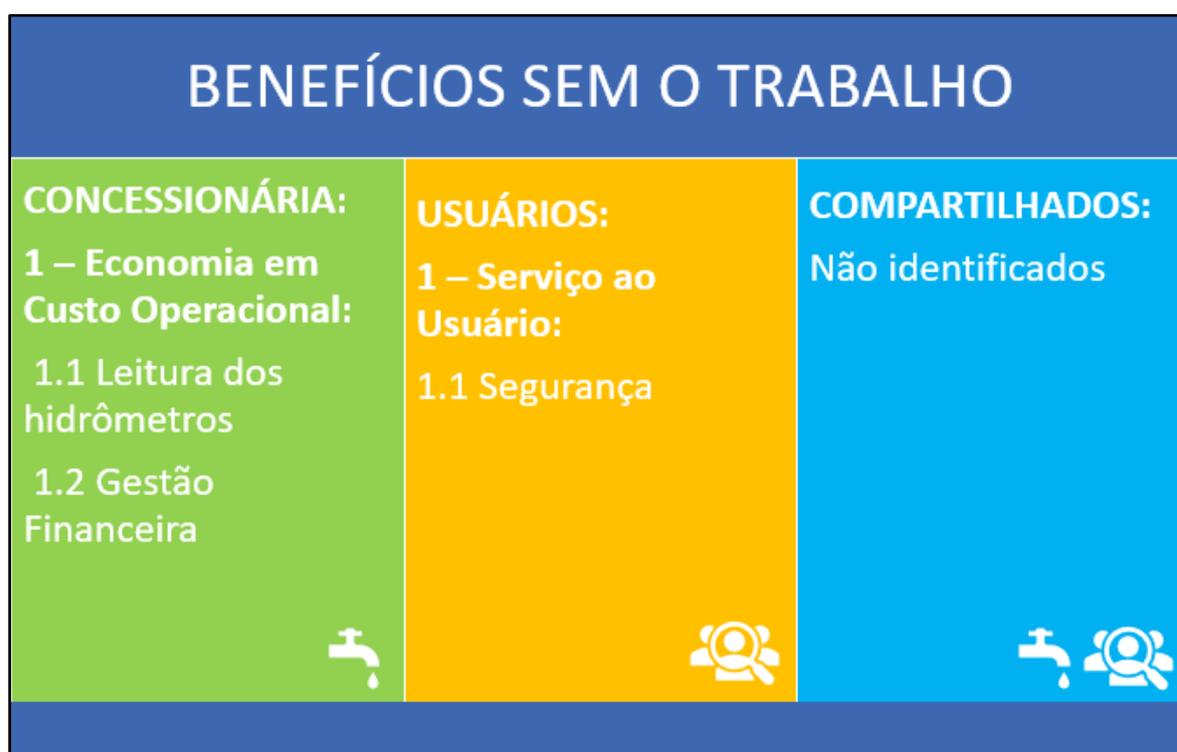


Figura 23 – Benefícios da telemetria desconsiderando o trabalho (cenário 01).

Da Tabela 15, onde constam os benefícios constatados neste trabalho, e da pesquisa qualitativa, feita com especialistas da Austrália, contida na documentação complementar do trabalho de Monks et al. (2020), que apresenta todos os benefícios possíveis e seus impactos econômicos percentuais, resulta a Tabela 16, onde se apresenta a avaliação do impacto percentual de cada um dos benefícios identificados na redução do custo operacional (economia gerada), com a quantidade de respostas dos especialistas por intervalos de impacto (são seis os intervalos de percentual de impacto: 0%, de 0 a 25%, de 25 a 45%, de 45 a 75%, de 75 a 90%, e de 90 a 100%). Também é apresentada, na Figura 24, a distribuição de frequências total, isto é, considerando todos os benefícios elencados nas Tabelas 15 e 16.

Código Benefício	Intervalo de Impacto / Quantidade de Opiniões					
	0%	0 a 25%	25 a 45%	45 a 75%	75 a 90%	90 a 100%
	M <sup>1</sup> : 0%	M: 12,5%	M: 35%	M: 60%	M: 82,5%	M: 95%
A	1	0	0	8	5	3
B	0	0	1	8	2	6
C	0	0	0	9	3	5
D	0	0	1	7	2	5
E	0	0	3	9	5	1
F	0	1	2	12	3	2
<b>Totais:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>53</b>	<b>20</b>	<b>22</b>
<b>Proporção</b>	<b>0,96%</b>	<b>0,96%</b>	<b>6,73%</b>	<b>50,96%</b>	<b>19,23%</b>	<b>21,15%</b>

<sup>1</sup> Valor médio do intervalo de impacto percentual.

Tabela 16 – Impacto percentual dos benefícios (cenário 01).

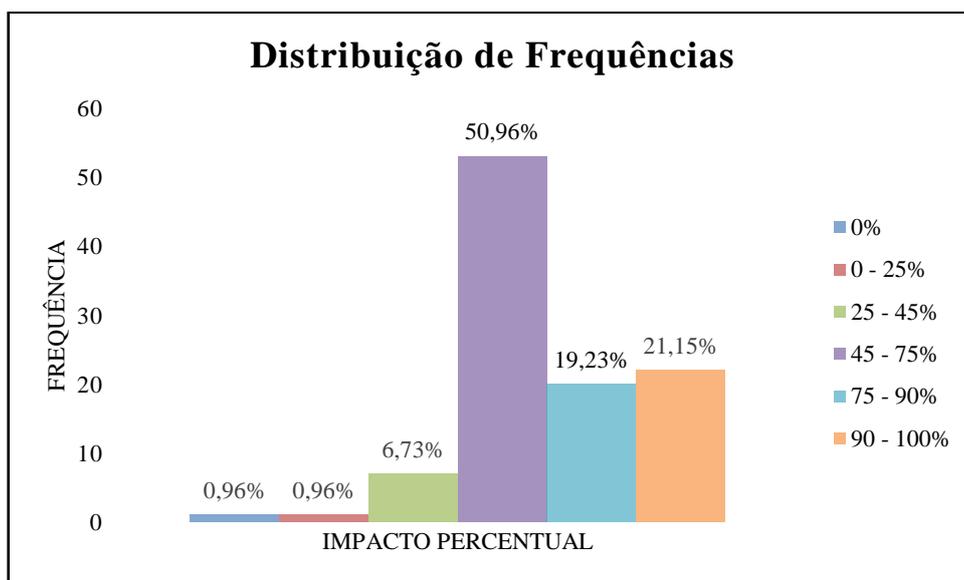


Figura 24 – Distribuição das frequências do percentual de impacto dos benefícios (cenário 01).

Para quantificar o impacto em termos da redução do custo operacional (R\$1.309.163.386,00 ou R\$1.870,82/ligação, em 2019, conforme demonstração financeira da Caesb), foi necessário estimar os custos proporcionais de cada um dos benefícios em relação ao operacional, e posteriormente, realizar as 50.000 iterações da SMC.

Foi calculado, em apuração junto à Caesb, os custos proporcionais dos gastos com leiturista/faturamento, a redução nos faturamentos estimados, os custos referentes à saúde e segurança ocupacional, e a redução de erros/perdas de dados de consumo residencial sem

receita. Quando não foi possível estimar os custos proporcionais, considerou-se 0%, visando a simulação dos piores cenários. Na tabela 17 estão os custos proporcionais considerados para cada benefício apurado (o detalhamento dos custos proporcionais de cada um dos benefícios utilizados para cálculo da distribuição está no Apêndice A deste trabalho).

<b>Benefícios</b>	<b>Proporção do Custo Operacional Considerado</b>
A	0,24%
B	0,11%
C	0,05%
D	0,00%
E	0,36%
F	0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>0,76%</b>

Tabela 17 – Proporção dos benefícios em relação ao custo operacional (cenário 01).

Os resultados da SMC estão expostos na Figura 25 e na Tabela 18. O modelo, que avaliou o custo operacional e os impactos proporcionais dos benefícios, considera uma distribuição semelhante à normal para redução de custo anual, e resultou em valor da mediana de R\$4.139,45. Sendo 95% a probabilidade de alcançar ao menos uma economia de R\$2.221,82, e 5% a de atingir mais de R\$6.065,83 (O código utilizado para os cálculos no “Rstudio” está disponível no Apêndice B).

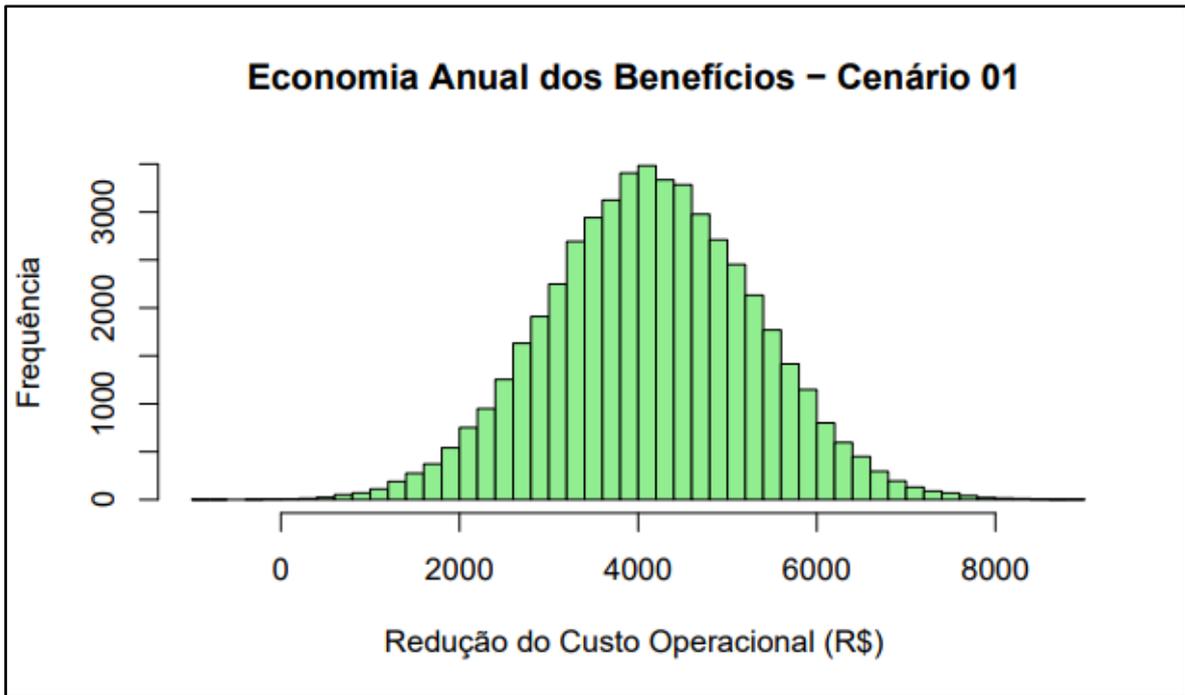


Figura 25 – Distribuição das frequências da redução do custo operacional do cenário 01 (SMC).

Distribuição	Média	Mediana	Desvio Padrão
Normal	R\$4.143,45	R\$4.139,38	R\$1.168,27

Tabela 18 – Resumo de resultados da SMC (cenário 01).

### 5.1.2 Benefícios da Telemetria Considerando Impactos do Trabalho – Cenário 02

De mesma maneira que no item anterior, diante das especificidades da área de estudo, foi desenvolvida a Tabela 19 e o diagrama da Figura 26, reproduzidos na sequência, onde são expostos os benefícios da medição automatizada para o caso avaliado. Todavia, neste item, cenário 02, foram considerados também, além da implantação do sistema, o estabelecimento de um alarme de vazamentos e falhas de medição, além da utilização de um DMC temporário, isto é, os Requisitos 01, 03 e 06 da Tabela 05.

Categoria	Subcategoria	Benefício	Código
Economias em Custo Operacional	Leitura de medidores	Redução nos gastos com leituristas / faturamento	A
		Redução nos faturamentos estimados	B
		Redução nos custos de saúde e segurança ocupacional	C

		Redução nos custos de transporte e redução de emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE.	D
	Gestão	Redução de erros/perdas de dados de consumo de água residencial sem receita	E
	Financeira	Redução dos incidentes e custos de indenização devido à rompimentos e vazamentos	F
	Custos do Serviço	Redução de vazamentos de rede e dos volumes de água não faturados.	G
Serviço ao Usuário	Custo de Utilização	Redução no custo para os usuários devido ao alerta de vazamentos	H
		Redução de sinistros	I
	Segurança	Maior segurança para proprietários e moradores	J

Tabela 19 – Benefícios da telemetria considerando o trabalho (cenário 02).



Figura 26 – Benefícios da telemetria considerando o trabalho (cenário 02).

Da Tabela 19, onde constam os benefícios constatados neste trabalho, e da pesquisa qualitativa, feita com especialistas da Austrália, contida na documentação complementar do trabalho de Monks et al. (2020), que apresenta todos os benefícios possíveis e seus impactos econômicos percentuais, resulta a Tabela 20, onde se apresenta a avaliação do impacto percentual de cada um dos benefícios identificados na redução do custo operacional

(economia gerada), com a quantidade de respostas dos especialistas por intervalos de impacto (mesmos do item anterior). Do mesmo modo que no cenário 01, é apresentada, na Figura 27, a distribuição de frequências total, isto é, considerando todos os benefícios elencados nas Tabelas 19 e 20.

Código Benefício	Intervalo de Impacto / Quantidade de Opiniões					
	0%	0 a 25%	25 a 45%	45 a 75%	75 a 90%	90 a 100%
	M <sup>1</sup> : 0%	M: 12,5%	M: 35%	M: 60%	M: 82,5%	M:95%
A	1	0	0	8	5	3
B	0	0	1	8	2	6
C	0	0	0	9	3	5
D	0	0	1	7	2	5
E	0	0	3	9	5	1
F	1	0	1	4	2	0
G	0	0	0	6	2	0
H	0	0	0	15	10	2
I	1	0	0	2	0	2
J	0	1	2	12	3	2
<b>Totais:</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>8</b>	<b>80</b>	<b>34</b>	<b>26</b>
<b>Proporção</b>	<b>1,97%</b>	<b>0,66%</b>	<b>5,26%</b>	<b>52,63%</b>	<b>22,37%</b>	<b>17,11%</b>

<sup>1</sup> Valor médio do intervalo de impacto percentual.

Tabela 20 – Impacto percentual dos benefícios (cenário 02).

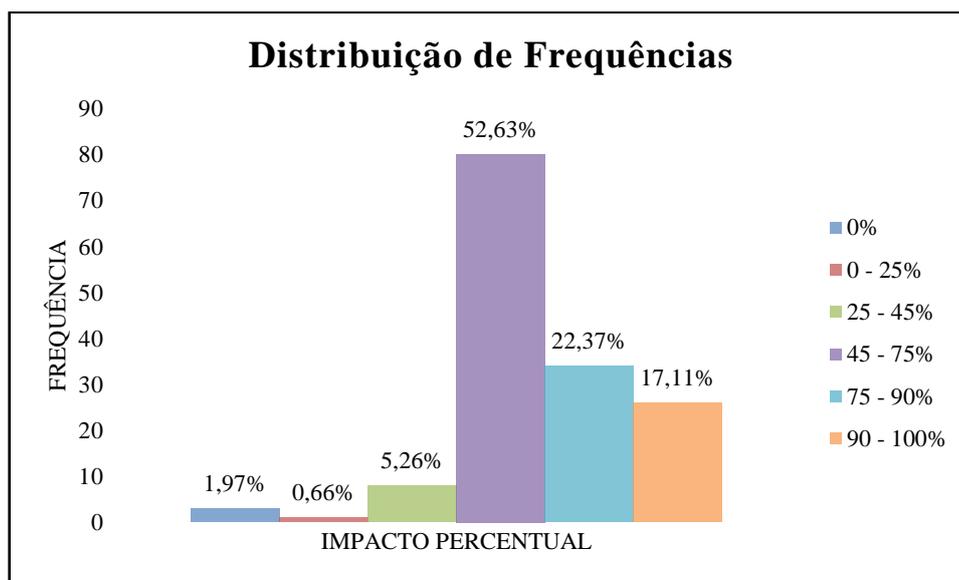


Figura 27 – Distribuição das frequências do percentual de impacto dos benefícios (cenário 02).

De modo semelhante ao que foi feito anteriormente, para quantificar o impacto em termos da redução do custo operacional (R\$1.309.163.386,00 ou R\$1.870,82/ligação, em 2019, conforme demonstração financeira da Caesb), foi necessário estimar os custos proporcionais de cada um dos benefícios em relação ao operacional, e posteriormente, realizar as 50.000 iterações da SMC.

Para isso, foi calculado, em apuração junto à Caesb, além dos custos apresentados no item anterior (Tabela 17), os custos referentes à vazamentos de rede, à vazamentos internos (em instalações do usuário), e à incidentes e custos de indenização/sinistros (neste último caso, considerou-se o custo para o usuário nulo, benefício I, sendo todo custo absorvido pela companhia de saneamento, benefício F). Quando não foi possível estimar os custos proporcionais, considerou-se 0%, visando a simulação dos piores cenários. Na Tabela 21 estão os custos proporcionais considerados para cada benefício apurado (o detalhamento dos custos proporcionais de cada um dos benefícios utilizados para cálculo da distribuição está no Apêndice A deste trabalho).

<b>Benefícios</b>	<b>Proporção do Custo Operacional Considerado</b>
A	0,24%
B	0,11%
C	0,05%
D	0,00%
E	0,36%
F	0,01%
G	3,51%
H	2,24%
I	0,00%
J	0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>6,52%</b>

Tabela 21 – Proporção dos benefícios em relação ao custo operacional (cenário 02).

Os resultados da SMC estão expostos na Figura 28 e na Tabela 22. O modelo, que assim como no item anterior, considerou o custo operacional, os impactos proporcionais dos benefícios, e uma distribuição semelhante à normal para redução de custo anual, resultou em

um valor da mediana de R\$35.210,24. Sendo 95% a probabilidade de alcançar ao menos uma economia de R\$18.692,35, e 5% a de atingir mais de R\$51.679,43 (O código utilizado para os cálculos no “Rstudio” está disponível no Apêndice B).

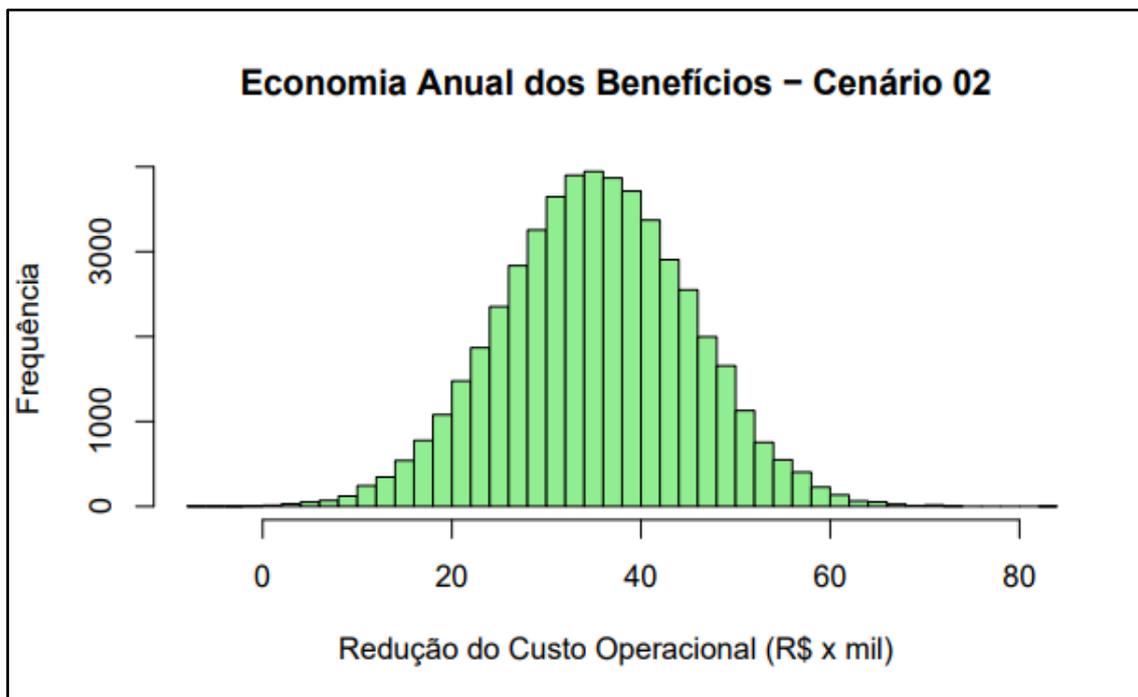


Figura 28 – Distribuição das frequências da redução do custo operacional do cenário 02 (SMC).

<b>Distribuição</b>	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Normal	R\$35.185,19	R\$35.210,24	R\$10.027,36

Tabela 22 – Resumo de resultados da SMC (cenário 02).

É importante esclarecer que os benefícios levantados (Tabela 15 e 19) se referem tanto àqueles apurados com impacto para concessionária de água quanto àqueles apurados com impacto para os usuários, sendo necessário, portanto, estipular a origem dos recursos para investimentos (concessionária ou usuário), quando se pretender realizar uma avaliação econômica deste tipo de projeto.

A comparação entre volume médio consumido pelo condomínio, no mês anterior a implantação do sistema (4403 m<sup>3</sup>/mês para o período de um ano) e após 12 meses da implantação do sistema de medição automatizado (4152 m<sup>3</sup>/mês para o período de um ano),

mostra que houve redução no consumo de aproximadamente 5,7%, de acordo com dados obtidos junto ao Sistema de Gestão Comercial da Caesb.

## 5.2 DADOS COLETADOS

Neste item são apresentados os dados obtidos a partir da medição de vazão, feita na saída do reservatório do condomínio, considerado ponto de entrada da rede de distribuição da área de estudo. Também são mostrados, resumidamente, os dados de volume consumidos e as séries temporais de consumo, ambos oriundos da medição automatizada. Os dados de consumo se referem a amostra selecionada para obtenção das séries temporais e para modelagem do consumo. Também foram coletados dados de consumo referentes ao período em que o medidor de vazão ficou instalado, para realização do balanço hídrico e cálculo dos indicadores propostos.

### 5.2.1 Dados da Medição de Vazão

Como mencionado anteriormente, foram 3.755 dados de vazão obtidos no período compreendido entre 09h41min de 27/11/2020 e 14h49min de 02/12/2020, com frequência de 2 minutos entre aquisições. As vazões máximas ( $Q_{max}$ ) e mínimas ( $Q_{min}$ ) obtidas, os volumes noturnos ( $VN,d$ ) consumidos, os volumes diários ( $Vd$ ) consumidos, assim como os gráficos de consumo no período, são apresentados na Tabela 23, e nas Figuras 29 e 30 (um extrato da base de dados está disponível no Apêndice C).

Atributo	Data					
	27/11/2020	28/11/2020	29/11/2020	30/11/2020	01/12/2020	02/12/2020
$Q_{max}$ (l/s)	4,11 (11:47)	4,49 (10:25)	4,06 (11:07)	4,62 (10:21)	3,82 (10:15)	3,98 (12:05)
$Q_{min}$ (l/s)	0,99 (23:11)	0,44 (02:01)	0,36 (03:21)	0,34 (03:57)	0,31 (03:39)	0,27 (03:41)
$VN,d$ (l)	0,00	5562,42	5127,72	4804,50	3761,70	5317,26
$Vd$ (l)	125662,92	176589,24	167779,44	184670,64	161858,94	98438,88

Tabela 23 – Resumo dos dados de medição de vazão.

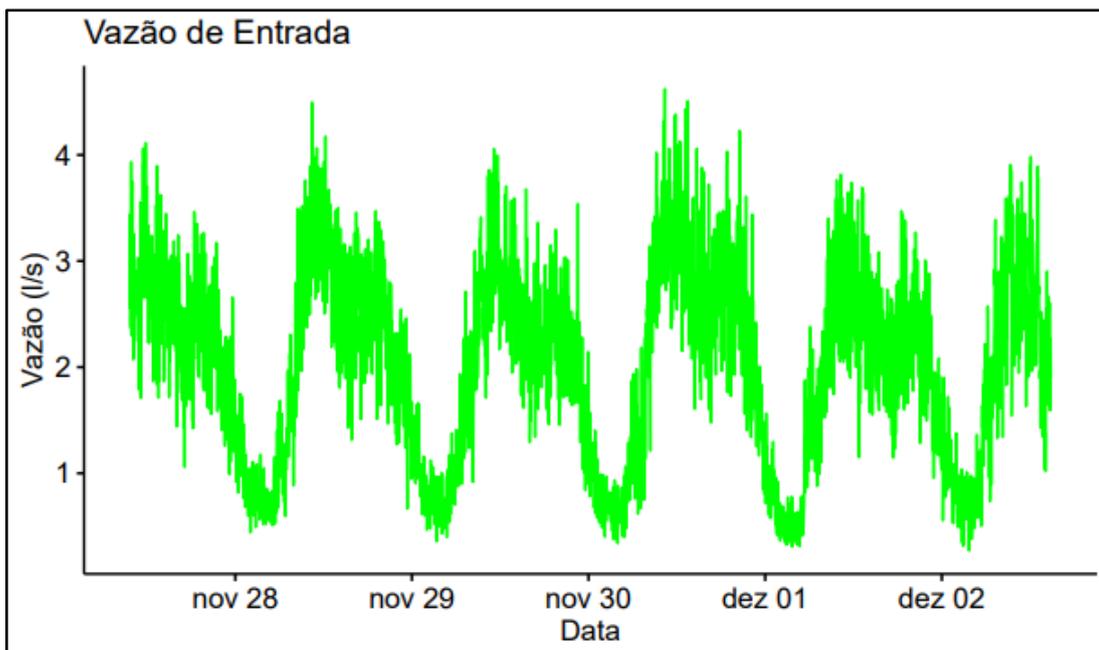


Figura 29 – Variação da vazão de entrada na área de estudo (2 min. entre aquisições).

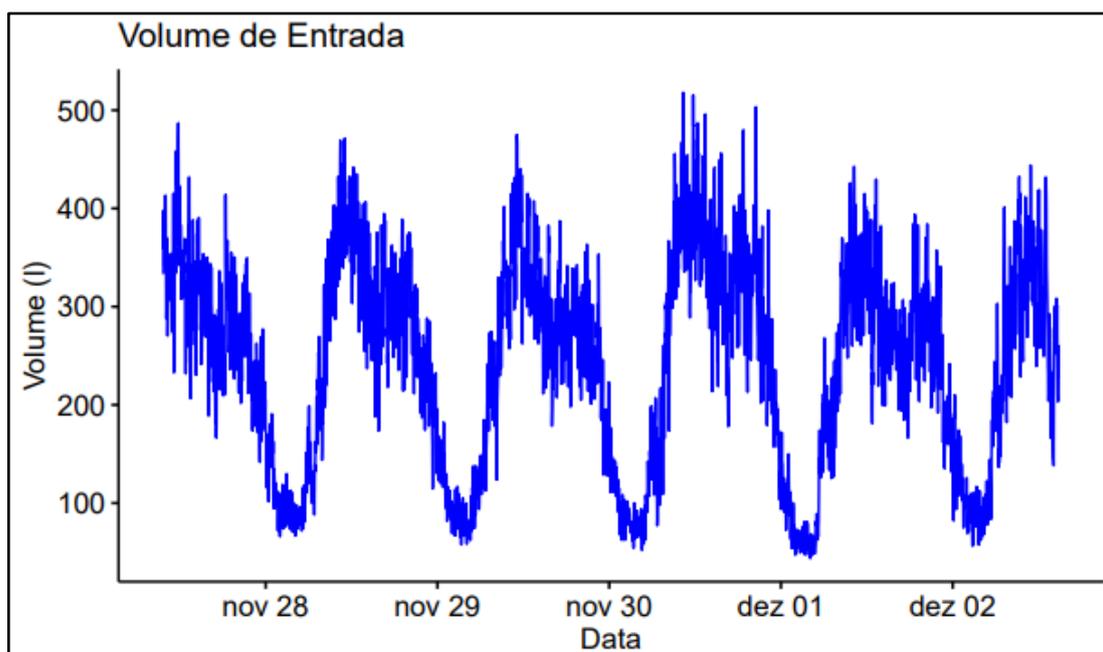


Figura 30 – Variação do volume de entrada na área de estudo (2 min. entre aquisições).

Da análise da tabela e dos gráficos se infere que a vazão máxima diária ocorre entre 10h15min e 12h05min, enquanto a vazão mínima ocorre entre 02h01min e 03h57min. Também é possível verificar que há sempre uma vazão mínima no condomínio, tendo sido seu menor valor 0,27 l/s, registrado às 03h41min do dia 02/12/2020, e seu maior valor 4,62 l/s, registrado às 10h21min do dia 30/11/2020. Há ainda evidência de dois picos diários de consumo, um no final do período da manhã/início da tarde e outro no final da tarde/início da

noite. A média da vazão no período foi 2,03 l/s e o volume médio consumido a cada dois minutos foi de 243,68 litros (os volumes foram calculados como o produto da média entre duas aquisições de vazão consecutivas pelo tempo de dois minutos).

Ainda, a título de ilustração, verificou-se, no mesmo período em que o medidor de vazão ficou instalado, o volume apurado pelo macromedidor do condomínio (instalado antes do reservatório). O resultado é a comparação entre volume diário medido por cada um dos aparelhos e está resumido na Figura 31. A princípio, considera-se que a diferença entre volumes se relaciona com o esvaziamento e enchimento do reservatório do condomínio, visto que o macromedidor está a montante e medidor de vazão foi instalado a jusante do castelo d'água. Contudo, foi constatado que as diferenças foram também impactadas por problemas de transmissão do macromedidor no período avaliado.

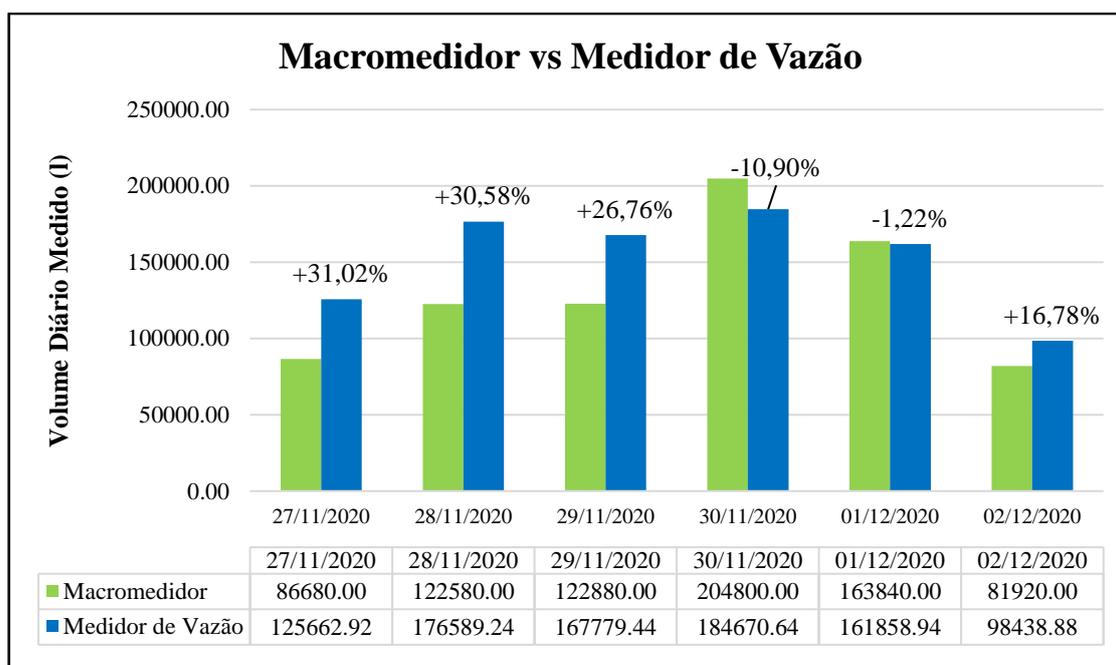


Figura 31 – Comparação entre volume apurado pelo macromedidor e pelo medidor de vazão.

### 5.2.2 Dados de Telemetria

Em consonância com o item 4.3.2, para determinação do Balanço Hídrico, foram compilados os dados de consumo diário do consumo das unidades do condomínio para o intervalo compreendido entre 28/11/2020 e 01/12/2020, que resultaram na Tabela 24:

Para modelagem do consumo, a amostragem para coleta dos dados de telemetria foi definida de acordo com as características arquitetônicas das unidades do condomínio. São 192 apartamentos, todos com dois dormitórios, outras 78 casas, também com dois dormitórios, e, por fim, 150 casas com três dormitórios. Para amostra, foram selecionadas aleatoriamente (excluindo aqueles medidores sem disponibilidade de dados), além do macromedidor e de dois hidrômetros de área comum, dez unidades, respeitando a proporção mínima da população, isto é, a quantidade de selecionada para cada tipo de unidade é a amostra (10 unidades) multiplicada pelo seu percentual da população e arredondada para cima. O procedimento resultou em quatro apartamentos, duas casas de dois dormitórios e quatro casas de três dormitórios. A definição da quantidade de unidades da amostra se relacionou com a necessidade de tratamento manual dos dados, que reduziu a capacidade de processamento.

O período de obtenção de dados foi de um ano ou 366 dias (entre 00h00min de 01/01/2020 e 23:59min de 31/12/2020), de acordo com o item 4.3.2. Na sequência está apresentada a Tabela 24, que resume as leituras obtidas para as unidades residenciais selecionadas na amostra, para os hidrômetros de área comum e para o macromedidor do condomínio.

<b>Unidades</b>	<b>Leituras Esperadas</b>	<b>Leituras Obtidas</b>	<b>Média de Leituras/Dia</b>	<b>Consumo Total</b>	<b>Média de Consumo/Dia</b>
Macromedidor	2.196	4.816	13,15	44.390,10 m <sup>3</sup>	121,28 m <sup>3</sup> /dia
Área Comum 01	2.196	2.275	6,22	297,03 m <sup>3</sup>	811,56 L/dia
Área Comum 02	2.196	1.919	5,24	18,45 m <sup>3</sup>	50,42 L/dia
Apartamento 01	2.196	2.146	5,86	216,96 m <sup>3</sup>	592,78 L/dia
Apartamento 02	2.196	2.053	5,61	220,24 m <sup>3</sup>	601,75 L/dia
Apartamento 03	2.196	2.143	5,86	174,89 m <sup>3</sup>	477,83 L/dia
Apartamento 04	2.196	2.005	5,48	117,68 m <sup>3</sup>	321,52 L/dia
Casa A <sup>1</sup> 01	2.196	2.298	6,28	295,47 m <sup>3</sup>	807,28 L/dia
Casa A 02	2.196	1.918	5,24	32,75 m <sup>3</sup>	89,47 L/dia
Casa B <sup>2</sup> 01	2.196	2.221	6,07	200,55 m <sup>3</sup>	547,95 L/dia
Casa B 02	2.196	2.153	5,88	163,78 m <sup>3</sup>	447,49 L/dia
Casa B 03	2.196	2.060	5,63	103,26 m <sup>3</sup>	282,14 L/dia
Casa B 04	2.196	2.397	6,55	289,68	791,48 L/dia

<sup>1</sup> Casas de dois dormitórios;

<sup>2</sup> Casas de três dormitórios.

Tabela 24 – Quadro resumo de leituras.

Para as unidades de consumo (excluindo o macromedidor), durante o período avaliado, além de falhas esporádicas, ficaram constatados alguns intervalos de dias sem comunicação do sistema, são eles: entre 03/01/2020 e 08/01/2020, entre 22/02/2020 e 27/02/2020, entre 24/04/2020 e 29/04/2020, entre 18/05/2020 e 05/06/2020, e, por último, entre 31/08/2020 e 09/09/2020.

Na sequência – Figuras 32 a 39 - estão apresentados os gráficos onde constam a média de consumo em cada hora de cada um dos dias da semana e para cada uma das unidades avaliadas. Importante ressaltar que os consumos são aqueles apurados para um período médio de quatro horas entre leituras.

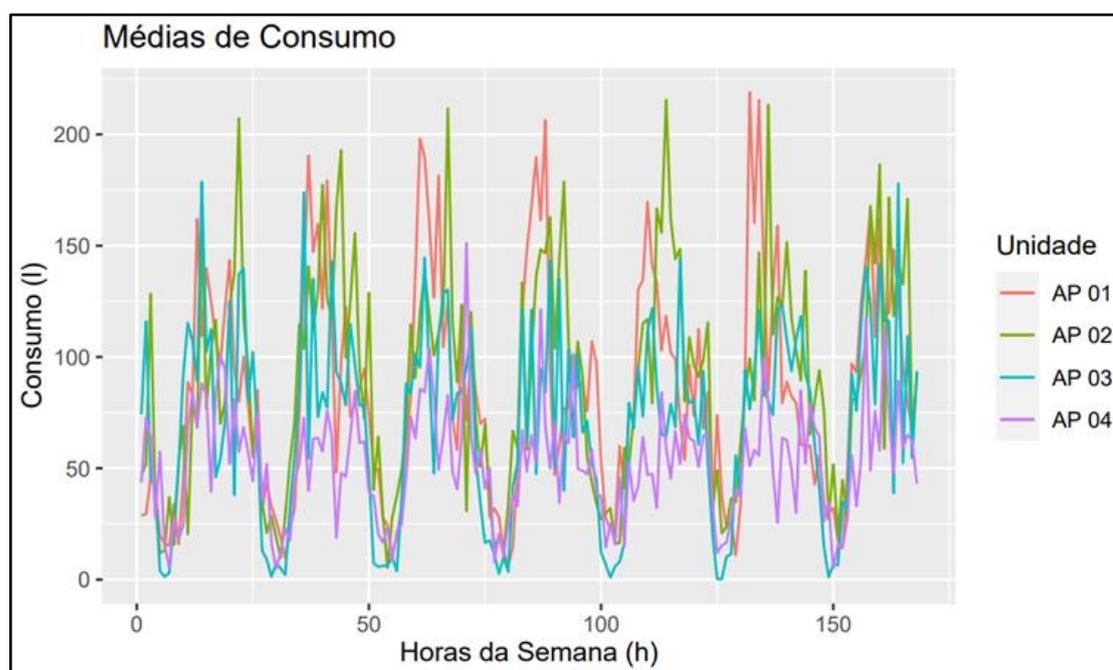


Figura 32 – Média de consumo em cada hora – Apartamentos

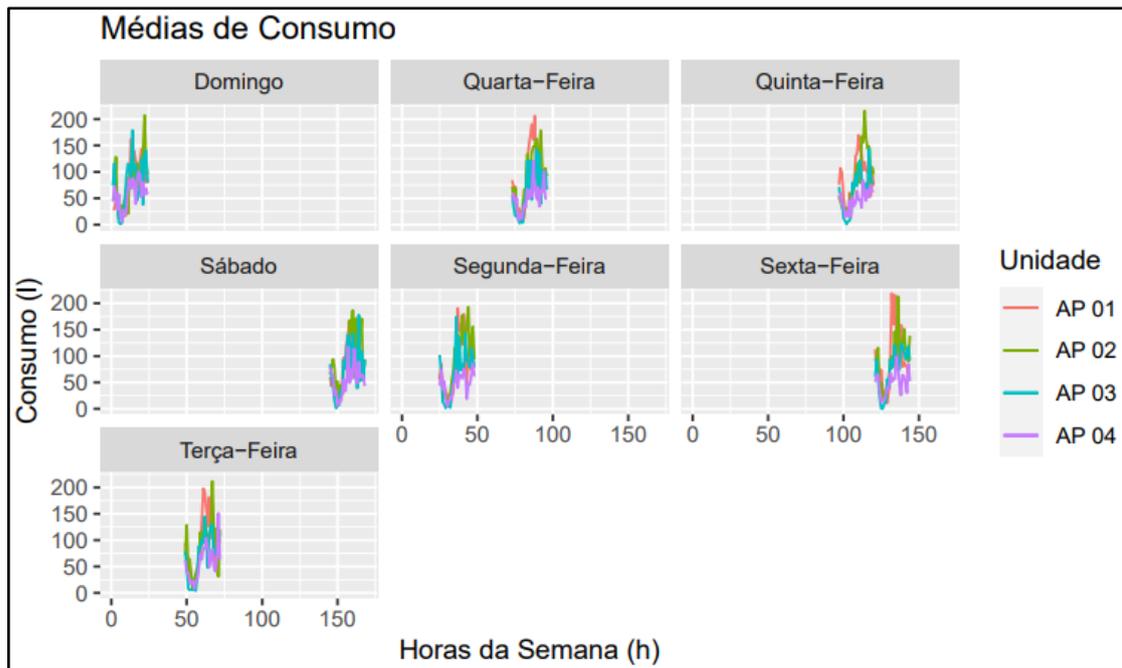


Figura 33 – Média de consumo em cada hora por dia – Apartamentos

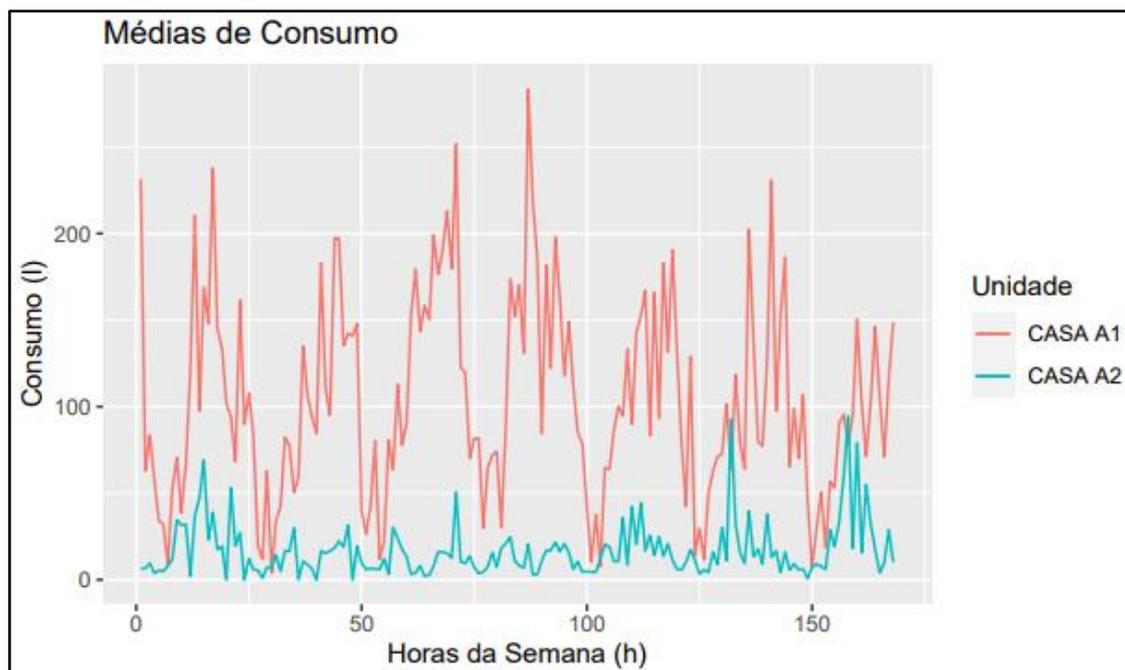


Figura 34 – Média de consumo em cada hora – Casas de dois dormitórios

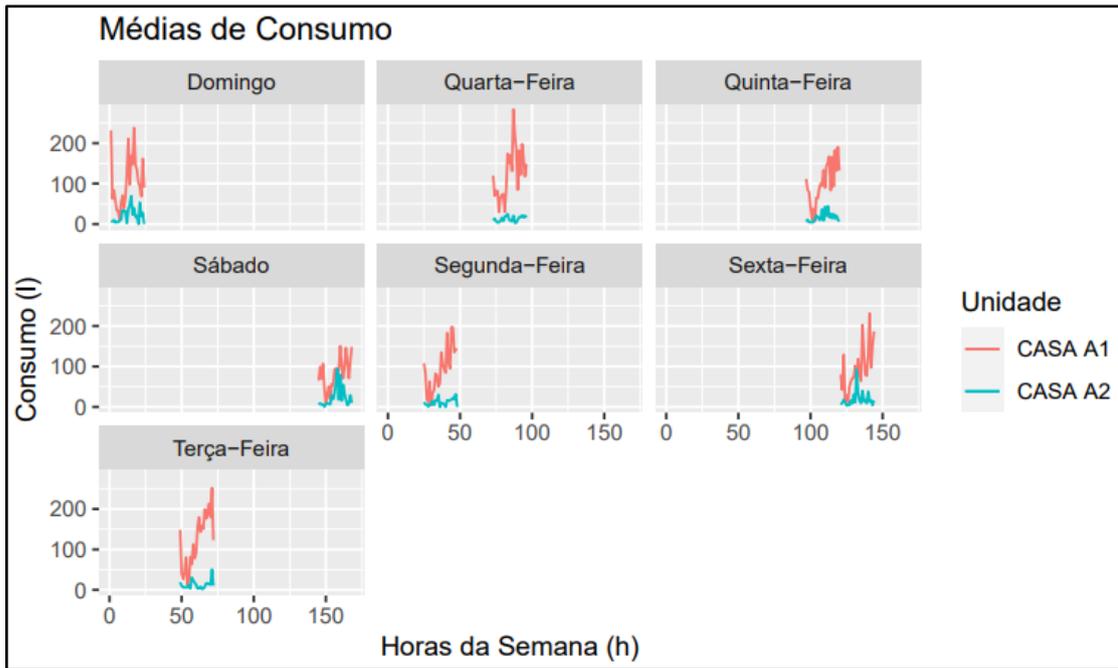


Figura 35 – Média de consumo em cada hora por dia - Casas de dois dormitórios

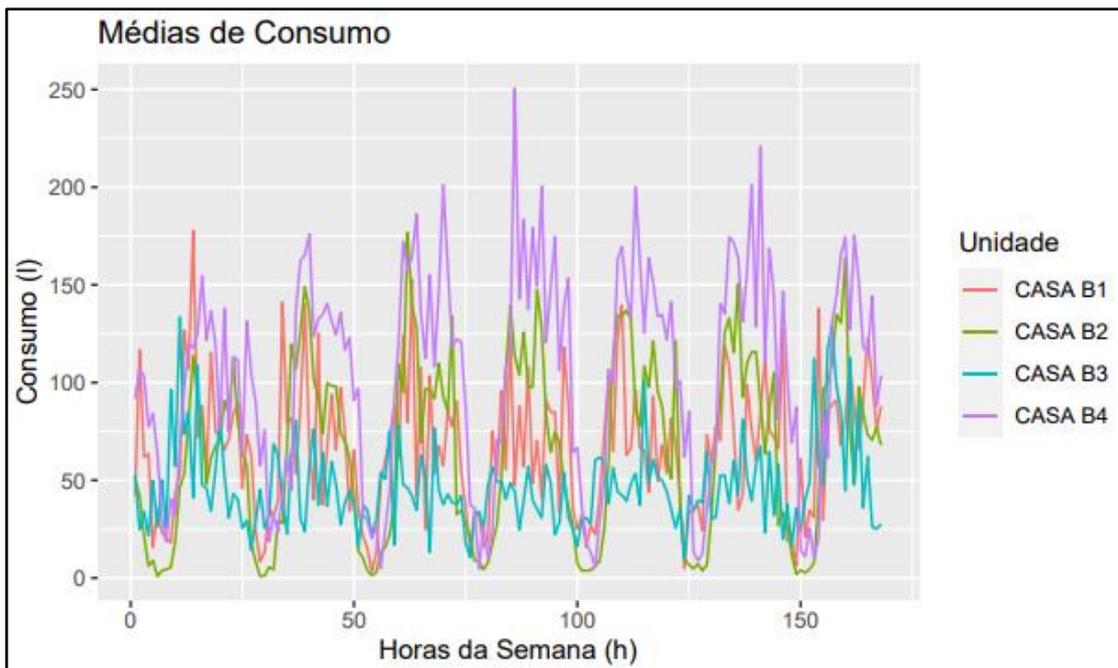


Figura 36 – Média de consumo em cada hora – Casas de três dormitórios

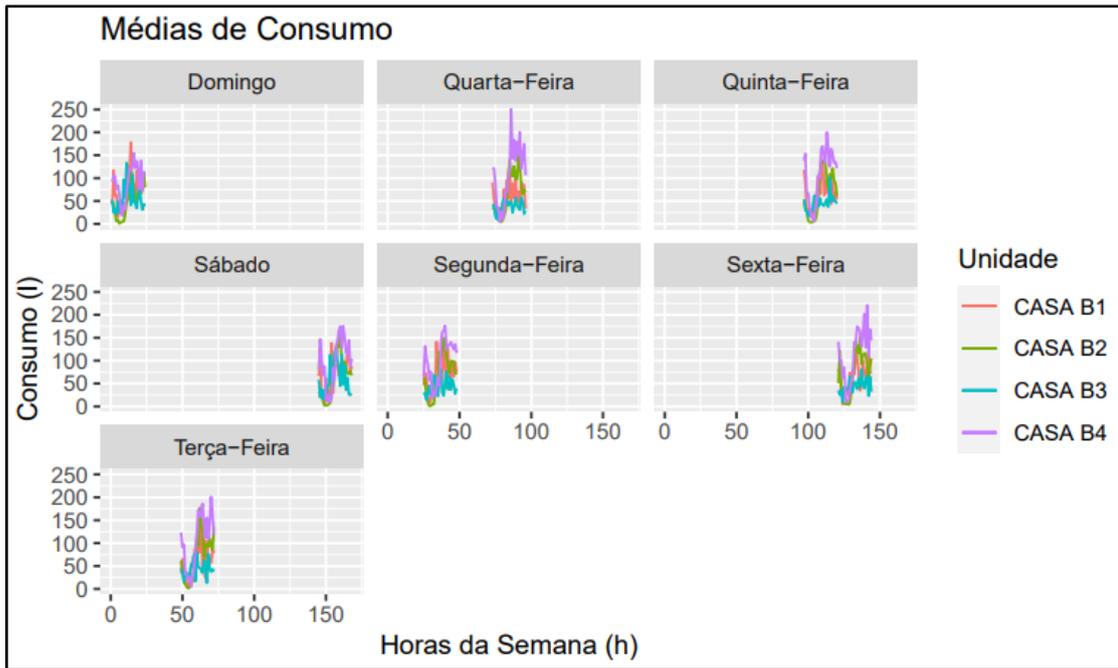


Figura 37 – Média de consumo em cada hora por dia - Casas de três dormitórios

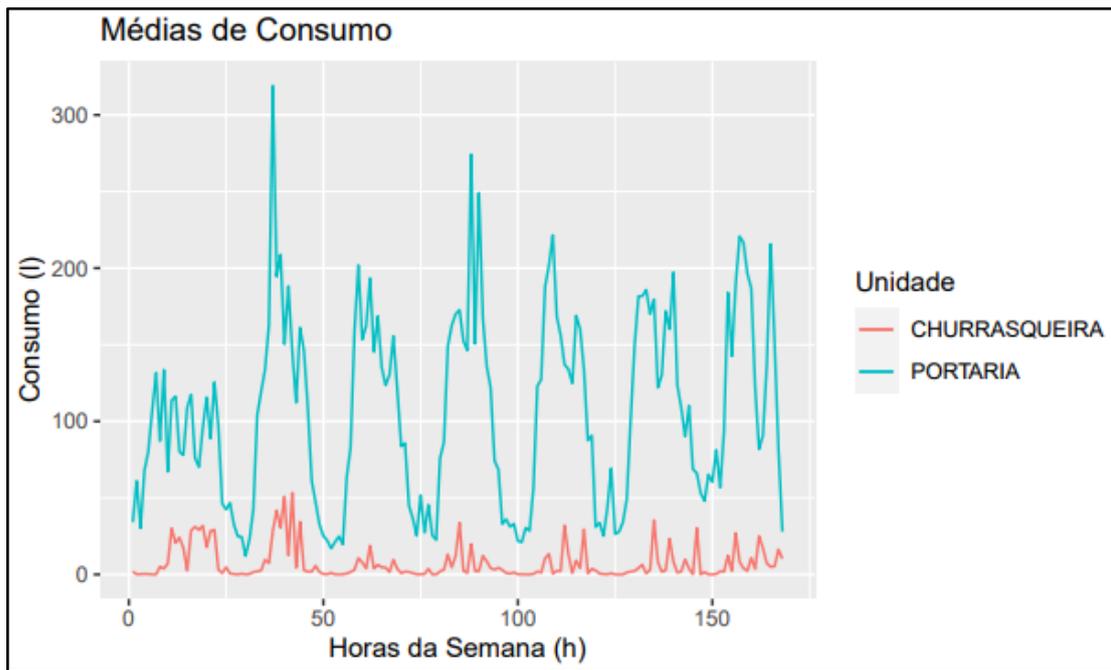


Figura 38 – Média de consumo em cada hora – Áreas comuns

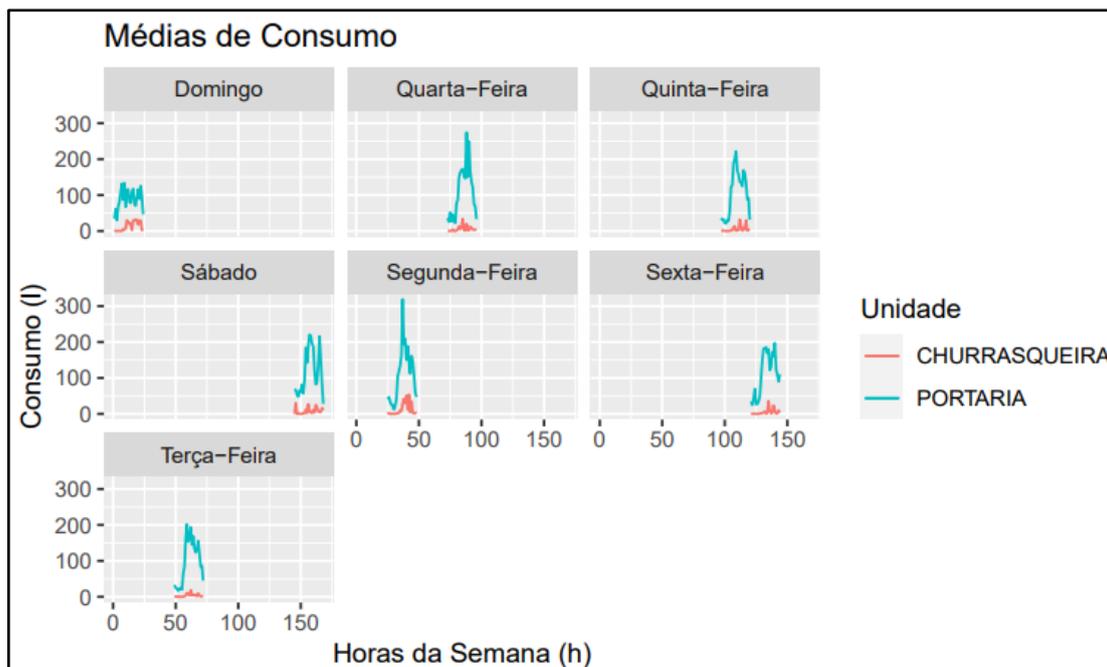


Figura 39 – Média de consumo em cada hora por dia - Áreas comuns

O sistema de transmissão de dados referente ao macromedidor (equipamentos e rede de transmissão) apresentou problemas durante todo o período avaliado, principalmente a partir do mês de maio de 2020, quando a transmissão passou a ficar ainda mais intermitente e a leitura passou a regredir em diversos momentos. Diante disso, apenas os meses de janeiro a abril foram aqui considerados. Nestes meses houve leitura horária no intervalo compreendido entre 01h00min e 20h00min, enquanto no período compreendido entre 20h00min e 01h00min a transmissão ocorreu em frequência menor. Nesse contexto, apresenta-se na sequência – Figuras 40 e 41 - apenas a média de consumo horário para o intervalo entre 01h00min e 20h00min para cada um dos dias da semana dos primeiros meses do ano de 2020 (janeiro a abril)

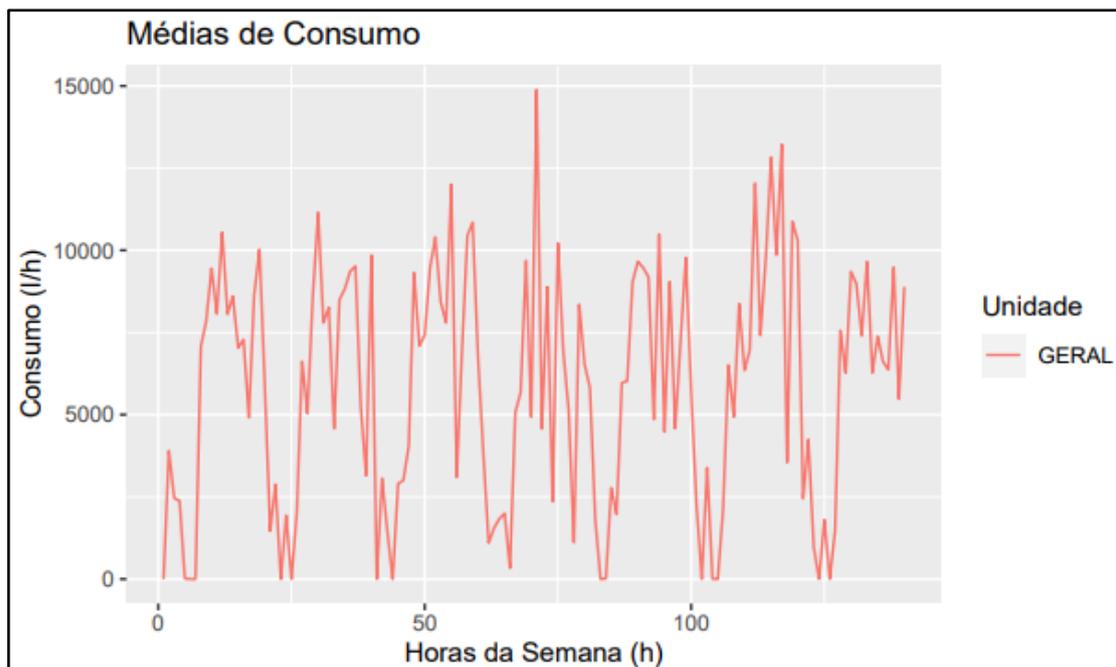


Figura 40 – Média de consumo horária (01h00min as 20h00min) – Macromedidor (Hid. Geral)

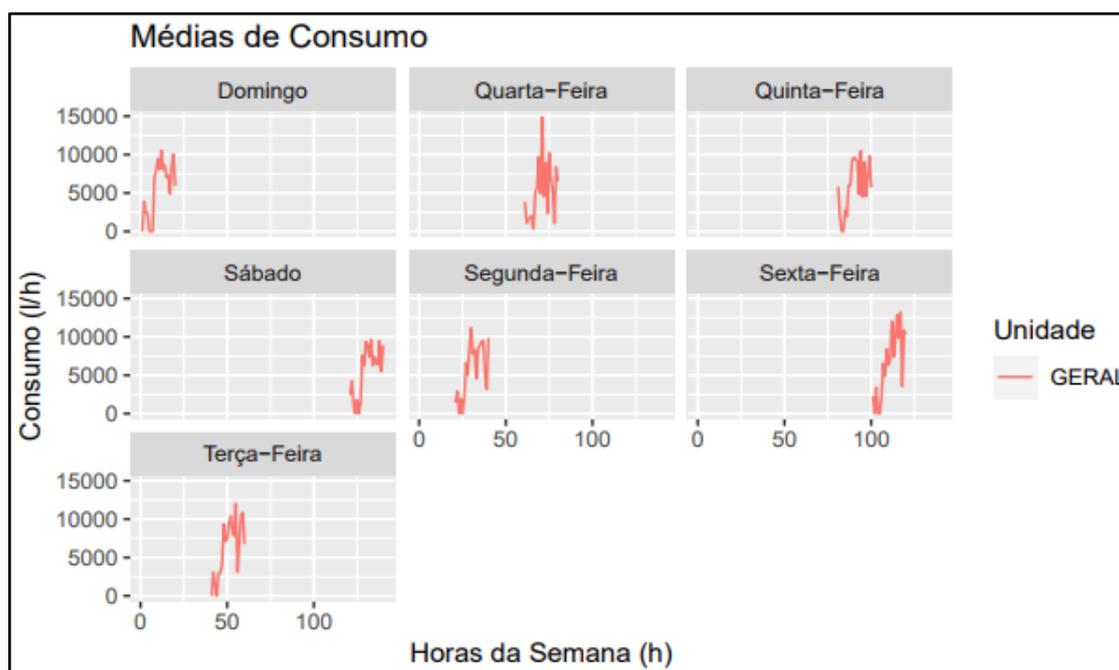


Figura 41 – Média de consumo horária (01h00min as 20h00min) por dia – Macromedidor (Hid. Geral)

### 5.2.3 Séries Temporais de Consumo

Para montar, a partir dos dados de leitura remota, as séries temporais de consumo da amostra selecionada (Tabela 24), foi necessário excluir da base de dados as leituras informadas com

frequência inferior àquela preconizada e incluir leituras para as quais o intervalo entre envio de dados era inferior ao recomendado.

Conforme Tabela 10, a frequência de transmissão de dados de leitura para as unidades de consumo (residências e áreas comuns) é de quatro horas e, portanto, respeitou-se esse intervalo para tratamento da base de dados. Em decorrência disso, os dados de consumo, que são a diferença entre leituras subsequentes, foram divididos por quatro para obtenção da vazão de consumo em l/h. Mais uma vez se destaca que o período ao qual se referem as séries temporais foi o ano de 2020 (entre 00h00min de 01/01/2020 e 23:59min de 31/12/2020).

Também, devido a problemas de comunicação, conforme exposto no item anterior, não foi possível obter série temporal a partir dos dados do macromedidor, visto que apresentaram frequência inconstante e pouca confiabilidade.

Nos casos em que foi necessário fazer a interpolação das séries temporais, para inclusão de dados de leitura, utilizou-se os dados apresentados nas Figuras 32 a 39, que se referem às médias de consumo a cada quatro horas para cada uma das horas da semana.

Na sequência estão apresentadas a Tabela 25 e as Figuras 42 e 43 onde constam respectivamente um extrato da série temporal compilada para o Apartamento 01 e o gráfico das séries temporais da amostra selecionada.

<b>Consumo (l/h)</b>	<b>Data</b>	<b>Início (hora)</b>	<b>Fim (hora)</b>
28	03/01/2020	20	0
18	03/01/2020	0	4
3	03/01/2020	4	8
40	03/01/2020	8	12
32	03/01/2020	12	16
20	03/01/2020	17	21
11	04/01/2020	21	1
8	04/01/2020	1	5

24	04/01/2020	5	9
42	04/01/2020	9	13
30	04/01/2020	13	17
20	04/01/2020	17	21

Tabela 25 – Extrato da série temporal – Apartamento 01.

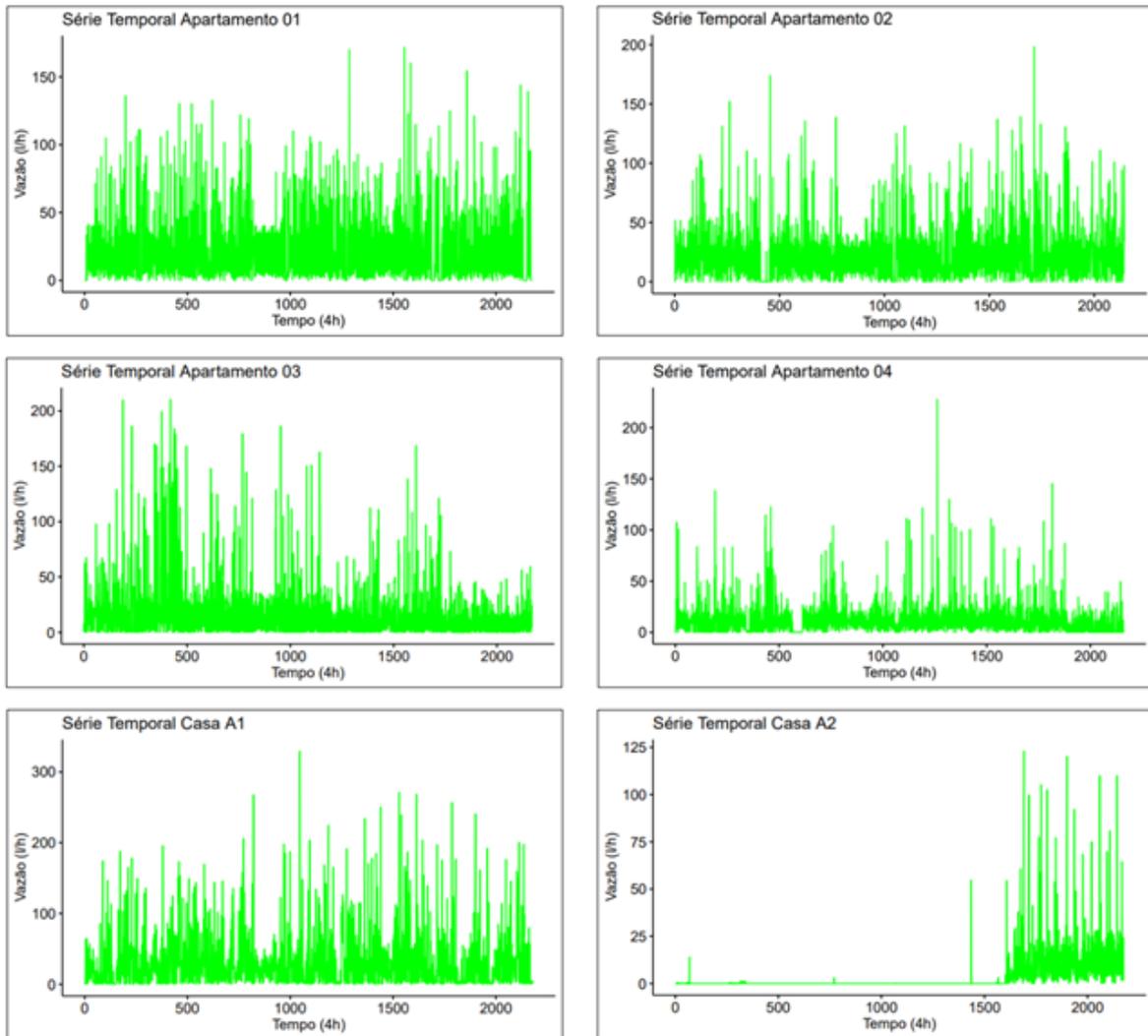


Figura 42 – Séries Temporais de Consumo – Apartamentos e Casas Tipo A (2 dormitórios)

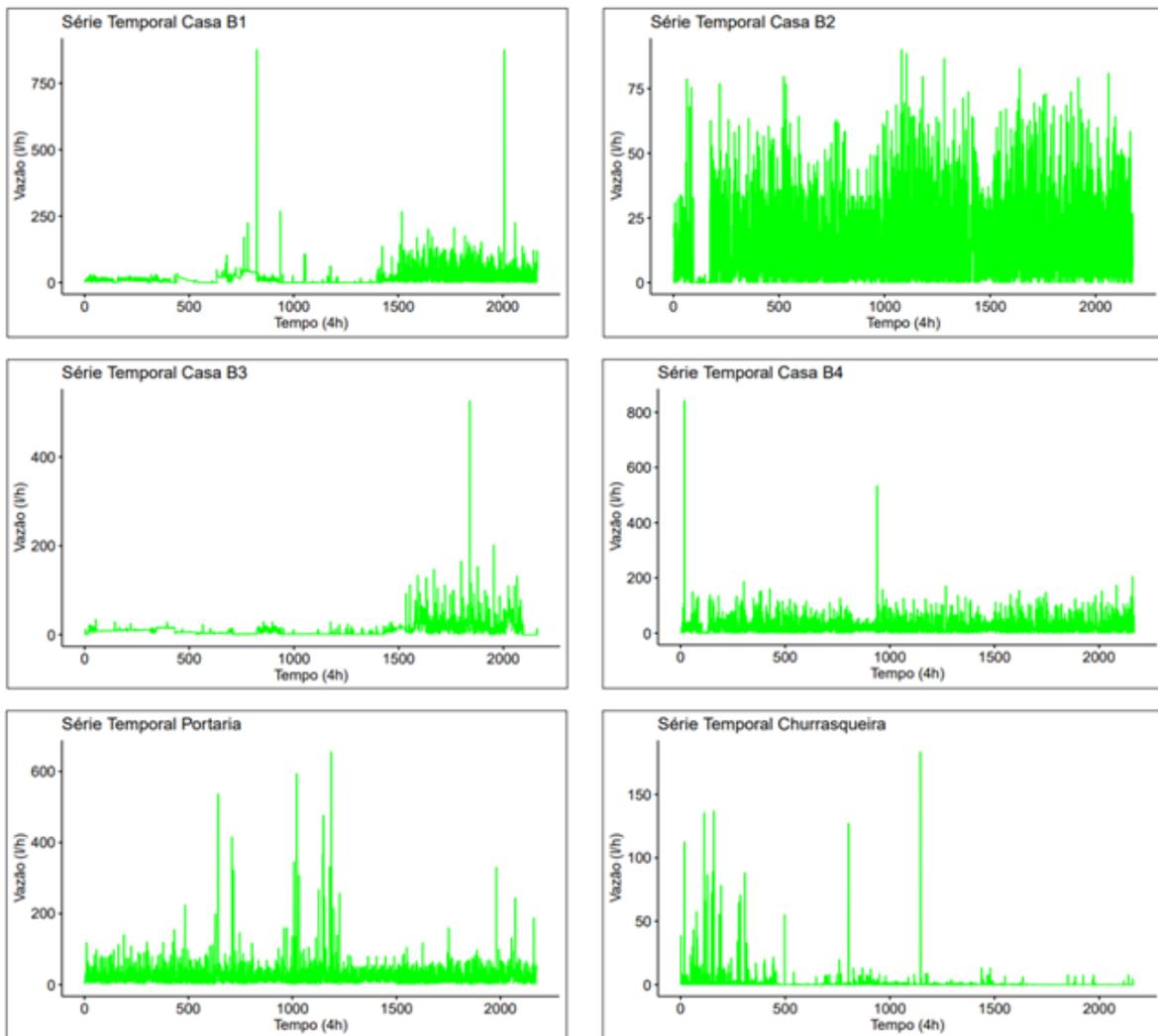


Figura 43 – Séries Temporais de Consumo – Casas Tipo B (3 dormitórios) e Áreas Comuns

A simples análise visual dos gráficos das séries temporais permite algumas inferências, tais como: identificação de períodos em que as unidades residenciais permaneceram desabitadas; diagnóstico de alguns prováveis eventos de perdas de água; e, por fim, avaliando a série referente à churrasqueira do condomínio, constata-se a redução das atividades nas áreas comuns do condomínio após recrudescimento da pandemia da Covid-19, em março de 2020.

### 5.3 MODELAGEM DO CONSUMO DE ÁGUA

Neste item são apresentados os resultados da modelagem para a amostra selecionada e para cada um dos três modelos utilizados. São, portanto, apresentados na sequência respectivamente os resultados do modelo ARIMA, do modelo SARIMA e da Regressão

Linear Múltipla ou Multivariada (Os códigos utilizados para as modelagens, feitas no “Rstudio”, estão disponíveis no Apêndice B).

### 5.3.1 Modelo ARIMA

De acordo com o método abordado no item 4.4.1, cada uma das séries temporais de consumo da amostra foi modelada com o modelo ARIMA que, conforme item 3.1.1, aplica os conceitos de autorregressão (AR) e médias móveis (MA) para séries temporais que podem ou não ser estacionárias. Os resultados obtidos são apresentados na Figuras 44 e 45, onde consta o exemplo de uma das unidades, assim como na Tabela 26, onde constam os parâmetros (p,d,q) obtidos para cada modelagem e os valores da RMSE, do MAE e do AIC.

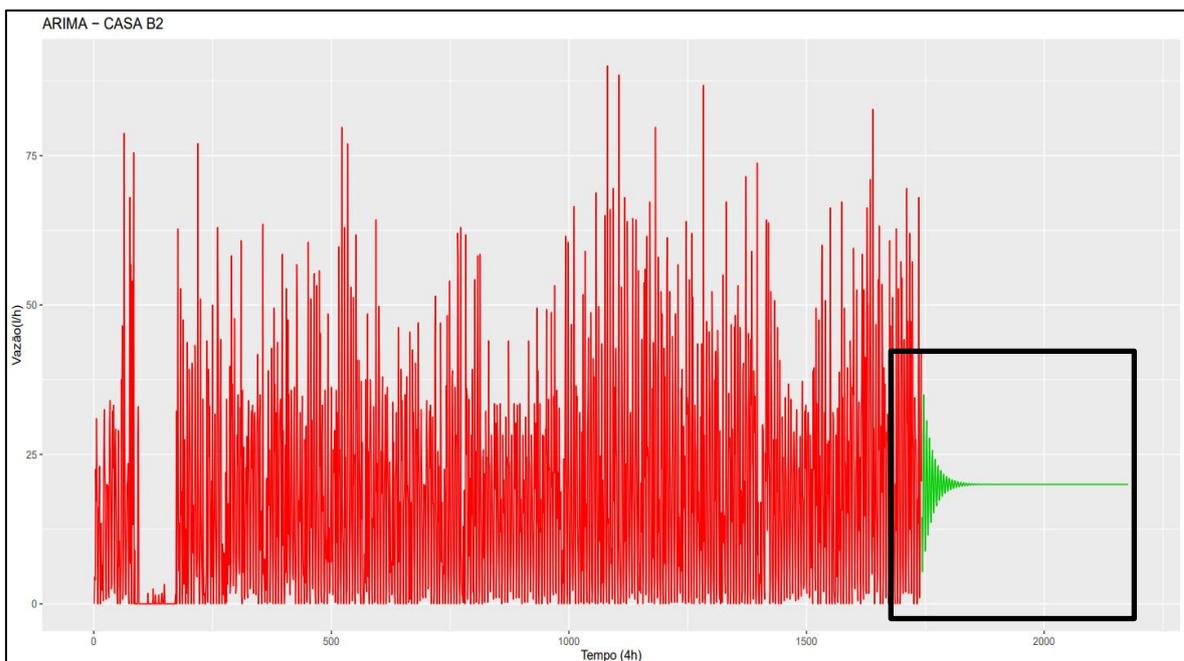


Figura 44 – Ajuste do Modelo ARIMA – Exemplo Casa B2 – Série Treino e Previsão



Figura 45 – Ajuste do Modelo ARIMA – Exemplo Casa B2 – Detalhe do Período de Previsão

<b>Unidade</b>	<b>Parâmetros (p,d,q)</b>	<b>AIC</b>	<b>RMSE</b>	<b>MAE(l/h)</b>
Apartamento 01	(5,0,1)	19473,94	21,20	15,62
Apartamento 02	(1,0,5)	19038,93	20,43	15,19
Apartamento 03	(1,1,0)	18728,30	18,11	13,65
Apartamento 04	(3,1,2)	16406,05	10,77	8,24
Casa A 01	(2,0,2)	20906,92	29,17	21,84
Casa A 02	(0,2,0)	23193,96	0,001	$5 \times 10^{-5}$
Casa B 01	(1,1,3)	17188,21	12,78	8,19
Casa B 02	(5,1,1)	17763,36	14,27	10,27
Casa B 03	(1,1,1)	11760,60	3,67	2,11
Casa B 04	(1,0,5)	20572,84	27,72	21,08
Portaria	(5,1,1)	18852,85	18,45	12,88
Churrasqueira	(5,2,0)	-297,42	0,22	0,11

Tabela 26 – Resultados da modelagem ARIMA.

Na Tabela 26 é possível identificar que as RMSEs obtidas para os modelos variam entre 0,001% e 29,17%, enquanto os MAEs variam entre  $5 \times 10^{-5}$  e 21,08. Importante destacar que os resultados obtidos para as séries com longos períodos sem consumo são mascarados pelo resultado da modelagem nesse período, quando o modelo “acerta” os consumos igual a zero.

Dos resultados apresentados, também é possível concluir que quanto maior a variabilidade do consumo e quanto maior a quantidade de leituras onde há ausência de consumo, piores são os resultados da modelagem.

Para os casos em que há longos períodos sem consumo o modelo tende a ser menos assertivo nos períodos de consumo, o que sugere a adoção da modelagem apenas para períodos de consumo. Também importante ressaltar que as séries temporais tratam do consumo das unidades e, portanto, apresentam sazonalidade, o que não é considerado neste tipo de modelagem.

Para todos os modelos foram obtidos resultados com desempenhos superiores à adoção da média ou da última observação.

### **5.3.2 Modelo SARIMA**

De acordo com o método abordado no item 4.4.1, cada uma das séries temporais de consumo da amostra foi modelada com o modelo SARIMA que, conforme item 3.1.1, aplica os conceitos do modelo ARIMA com adição dos termos sazonais. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 46 e 47, onde consta o exemplo de uma das unidades, assim como na Tabela 27, onde constam os parâmetros  $(p,d,q,P,D,Q,s)$  obtidos para cada modelagem e os valores da RMSE, do MAE e do AIC. Destaca-se que, para todos os modelos, utilizou-se o parâmetro  $s$  com valor igual a 6, dado o lapso temporal de 4 horas entre leituras, o que significa aproximadamente 6 dados por dia.

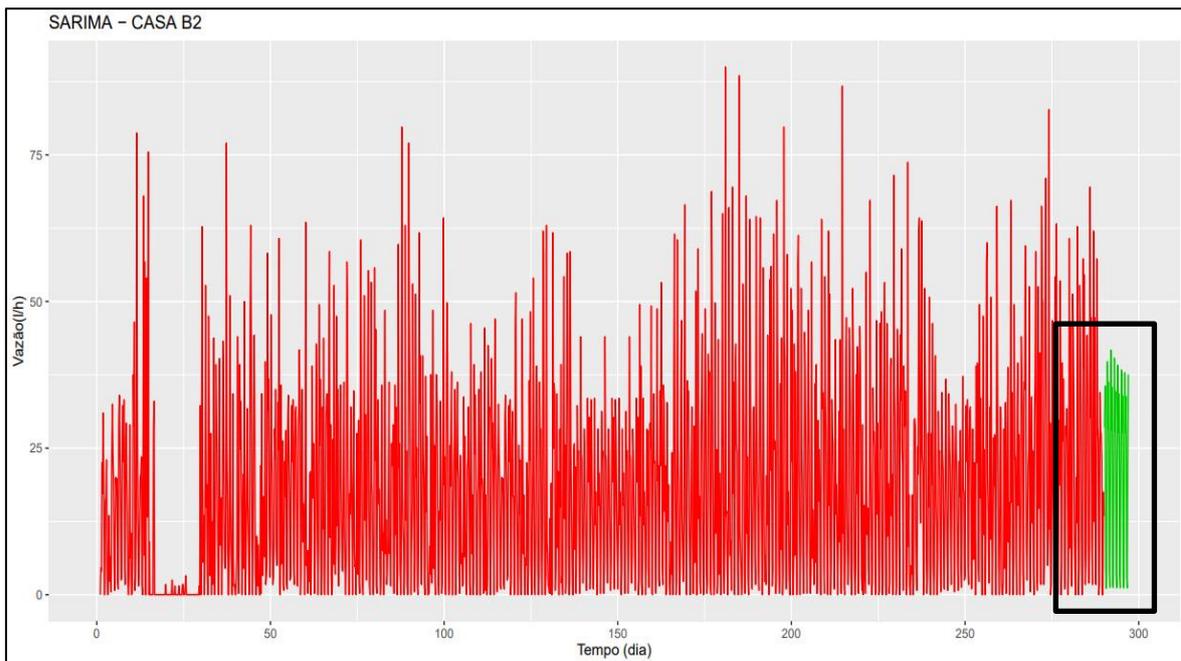


Figura 46 – Ajuste do Modelo SARIMA – Exemplo Casa B2 – Série Treino e Previsão

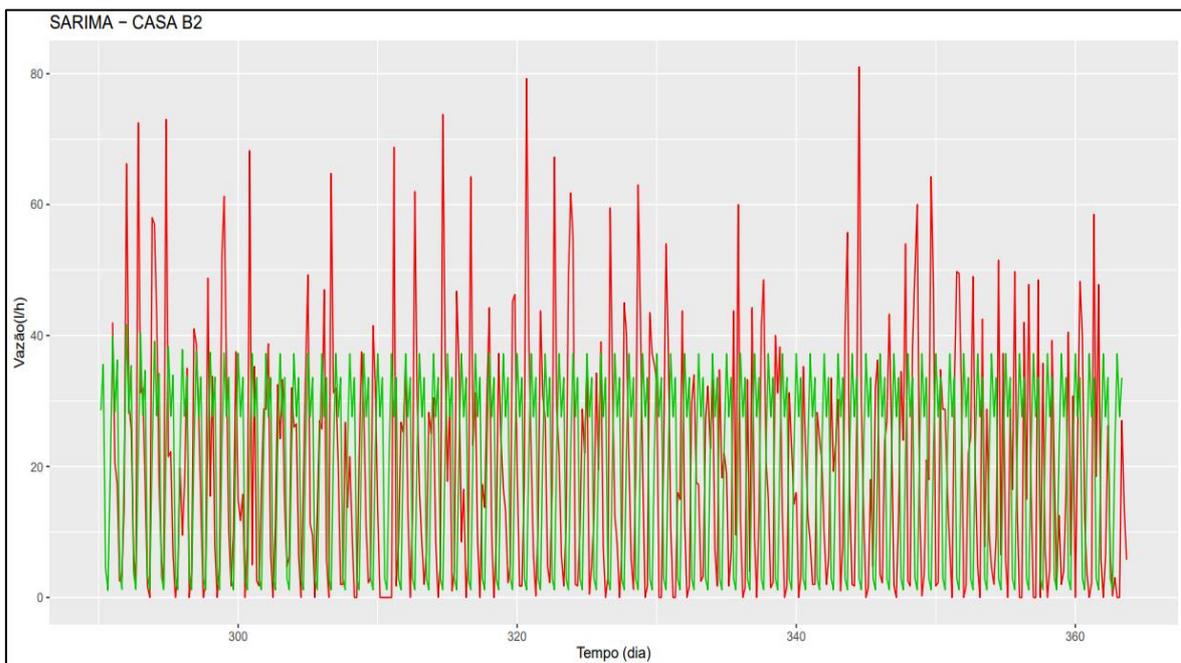


Figura 47 – Ajuste do Modelo SARIMA – Exemplo Casa B2 – Detalhe do Período de Previsão

<b>Unidade</b>	<b>Parâmetros (p,d,q,P,D,Q)[s]</b>	<b>AIC</b>	<b>RMSE</b>	<b>MAE(l/h)</b>
Apartamento 01	(1,0,1)(1,0,1)[6]	19036,87	19,18	13,65
Apartamento 02	(0,0,2)(1,0,1)[6]	18828,74	19,47	14,03
Apartamento 03	(5,1,0)(0,0,0)[6]	17617,55	14,00	10,09
Apartamento 04	(0,1,1)(2,0,0)[6]	16192,81	10,26	7,64

Casa A 01	(0,0,2)(2,0,0)[6]	20801,64	28,48	20,93
Casa A 02	(1,2,2)(0,0,2)[6]	-5904,81	0,06	0,02
Casa B 01	(1,1,1)(1,0,2)[6]	16642,41	11,25	7,00
Casa B 02	(0,0,0)(2,1,2)[6]	17316,89	12,99	8,78
Casa B 03	(1,1,1)(2,0,1)[6]	11630,04	3,55	2,08
Casa B 04	(1,0,2)(2,0,0)[6]	20286,00	25,95	18,98
Portaria	(3,0,0)(1,1,1)[6]	18363,70	16,63	11,34
Churrasqueira	(1,2,2)(2,0,0)[6]	-557,29	0,21	0,12

Tabela 27 – Resultados da modelagem SARIMA.

Na Tabela 27 é possível identificar que as RMSEs obtidas para os modelos variam entre 0,06% e 28,48%, enquanto os MAEs variam entre 0,02 e 20,93. Assim como no modelo ARIMA, é importante destacar que os resultados obtidos para as séries com longos períodos sem consumo são mascarados pelo resultado da modelagem nesse período, quando o modelo “acerta” os consumos igual a zero. De maneira geral, é possível afirmar que o modelo SARIMA apresentou melhor resultado do que o modelo ARIMA, o que era esperado, em função da sazonalidade das séries temporais de consumo.

As inferências sobre o impacto negativo da variabilidade do consumo na assertividade do modelo, assim como sobre o impacto negativo da presença de longos períodos com ausência de consumo, que pioram o desempenho nos períodos de consumo, também são verdadeiras para o modelo SARIMA. Neste cenário, também há evidências que indicam a adoção da modelagem apenas para períodos de consumo, ou com curtos intervalos sem demanda.

Para todos os modelos foram obtidos resultados com desempenhos superiores à adoção da média ou da última observação.

### 5.3.3 Regressão Linear Multivariada

Conforme proposto no item 4.4.3, para cada item da amostra foi construído modelo de Regressão Linear Multivariada, a fim de aproximar os valores de vazão obtidos, a partir dos consumos apurados pelos equipamentos de medição remota. Para isso, considerou-se como variáveis explicativas, a vazão de consumo média, de acordo com a hora, a vazão de consumo no intervalo anterior e as vazões de consumo para mesma hora de dias anteriores,

além do intervalo do dia para quando o consumo foi computado (6 intervalos de 4 horas, de acordo com a frequência de transmissão apresentada na Tabela 10). Importante ressaltar que a foram criadas variáveis “dummy” para representar o intervalo do dia em que o consumo aconteceu (Dado o grande volume de dados, apresenta-se no Apêndice C o extrato do banco de dados, para uma das unidades da amostra).

Para obter a melhor combinação de variáveis explicativas, inicialmente foram construídas as matrizes de correlação linear e feita a modelagem com todas as variáveis do banco de dados, a partir daí foram selecionadas as variáveis com maiores valores de coeficiente de Pearson, e com p-valor abaixo de 5%, para o teste da hipótese de o coeficiente daquela variável ser igual a zero.

Na Tabela 28, a seguir, estão todas as variáveis independentes inseridas no banco de dados de cada unidade da amostra:

<b>Variável Explicativa (Independente)</b>	<b>Código</b>
Média da vazão de consumo iniciada naquela hora	m
Vazão de consumo no intervalo anterior	V1
Vazão de consumo iniciada na mesma hora do dia anterior	V6
Vazão de consumo iniciada na mesma hora dois dias antes	V12
Vazão de consumo iniciada na mesma hora três dias antes	V18
Vazão de consumo iniciada na mesma hora quatro dias antes	V24
Vazão de consumo iniciada na mesma hora cinco dias antes	V30
Vazão de consumo iniciada na mesma hora seis dias antes	V36
Vazão de consumo iniciada na mesma hora sete dias antes	V42
Intervalo de consumo entre 02h00min e 05h59min	I1
Intervalo de consumo entre 06h00min e 09h59min	I2
Intervalo de consumo entre 10h00min e 13h59min	I3
Intervalo de consumo entre 14h00min e 17h59min	I4
Intervalo de consumo entre 18h00min e 21h59min	I5

Tabela 28 – Resumo de variáveis independentes do modelo de Regressão Linear Multivariada

Os resultados obtidos para cada uma das unidades são mostrados na Tabela 29, onde consta resumo de cada um dos modelos obtidos para as unidades, e nas Figuras 48 a 59, onde estão apresentados os gráficos de pareamento entre variável dependente e variáveis independentes (constando coeficientes de Pearson, distribuição de frequências e gráficos de dispersão) de cada um dos modelos obtidos.

Unidade	Variáveis Explicativas	Equação	AIC	R <sup>2</sup> Aj.	RME (l/h)
Ap. 01	m,V6,V12,V24,V36	$Y=-4,30+0,27X_1+0,07X_2+0,05X_3+0,06X_4+0,06X_5$	18590,24	0,42	18,86
Ap. 02	m,V1,V6,I3	$Y=-3,77+0,24X_1+0,20X_2+0,07X_3+3,64X_4$	18552,46	0,33	19,98
Ap. 03	m,V1,V6,V12,I2	$Y=-6,85+0,23X_1+0,20X_2+0,16X_3+0,13X_4+4,82X_5$	19274,47	0,31	22,86
Ap. 04	m,V6,V12,V24,V30	$Y=-2,19+0,21X_1+0,14X_2+0,09X_3+0,06X_4+0,04X_5$	17531,96	0,20	15,15
Casa A 01	m,V1,V24,I2,I3,I4	$Y=-9,13+0,27X_1+0,30X_2+5,27X_3+11,11X_4+14,34X_5$	21085,26	0,31	33,46
Casa A 02	m,V1,V24,V36,V42	$Y=-1,96+0,18X_1+0,31X_2+0,15X_3+0,11X_4+0,21X_5$	15201,28	0,42	8,52
Casa B 01	m,V1,V6,V12,V42	$Y=-7,76+0,24X_1+0,24X_2+0,12X_3+0,13X_4+0,14X_5$	21178,06	0,25	35,33
Casa B 02	m,V6,V24,V36	$Y=-1,29+0,21X_1+0,15X_2+0,08X_3+0,08X_4$	16654,15	0,58	11,69
Casa B 03	m,V1,V12,V36,V42	$Y=-4,36+0,15X_1+0,26X_2+0,17X_3+0,13X_4+0,19X_5$	18030,22	0,36	16,94
Casa B 04	m,V1,I3,I4	$Y=-5,92+0,30X_1+0,15X_2+6,67X_3+7,10X_4$	19962,49	0,34	26,42
Portaria	m,V1,V6,V12,I2	$Y=-9,70+0,25X_1+0,23X_2+0,09X_3+0,15X_4+6,61X_5$	21137,42	0,32	34,34
Churr.	m,V1,V12,V36	$Y=-0,77+0,21X_1+0,36X_2+0,09X_3+0,09X_4$	15526,07	0,24	8,75

Tabela 29 – Resumo dos resultados dos Modelos de Regressão Linear Multivariada

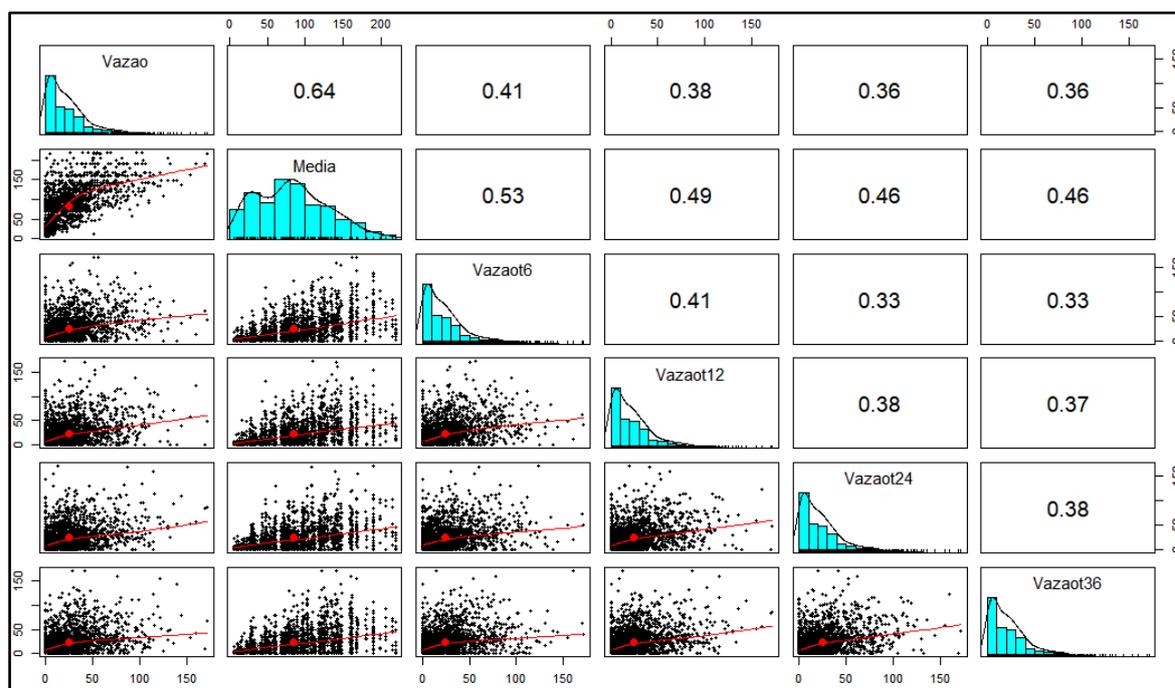


Figura 48 – Gráficos de pareamento – Apartamento 01

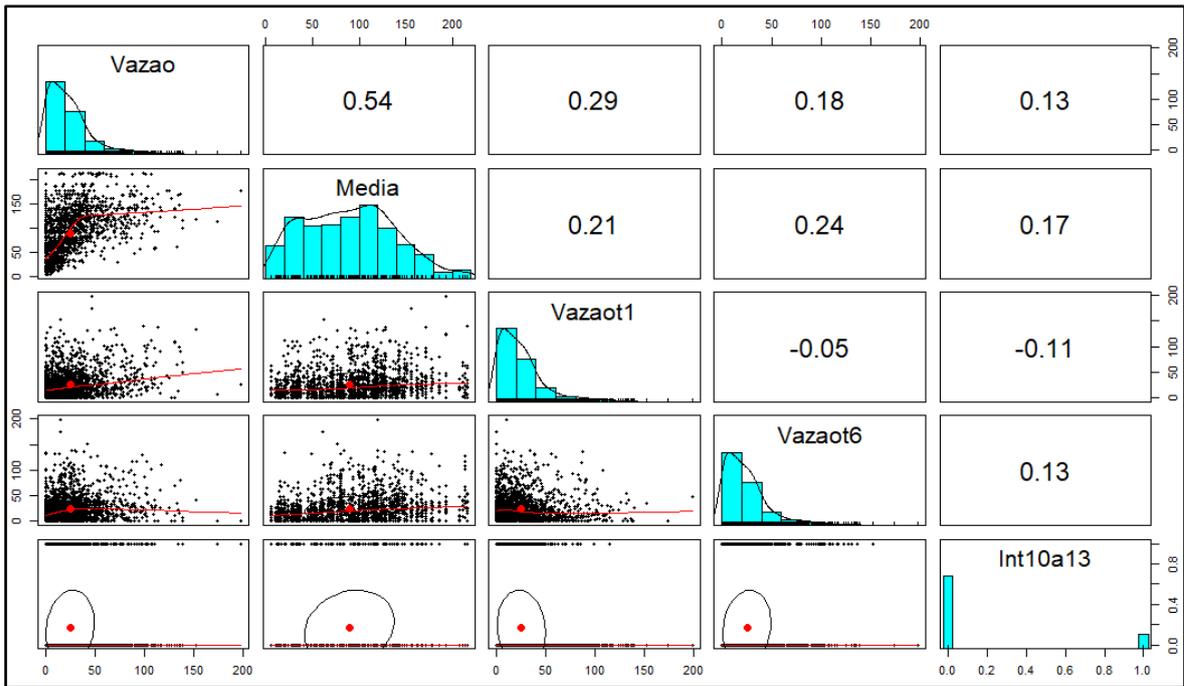


Figura 49 – Gráficos de pareamento – Apartamento 02

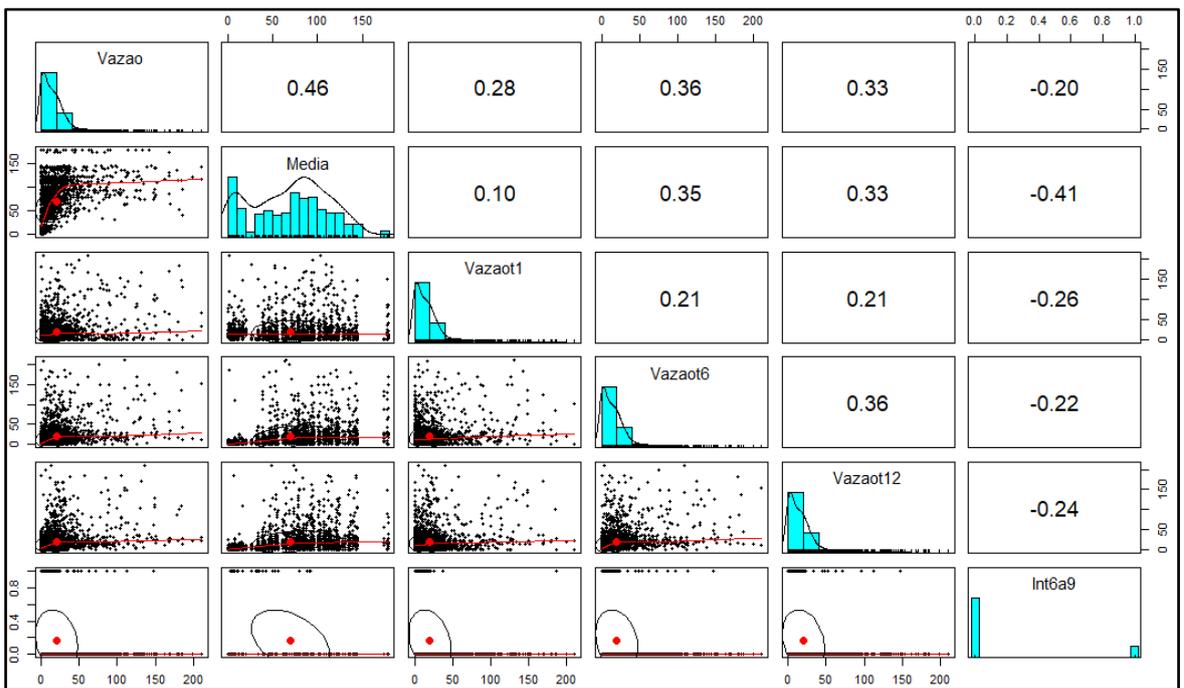


Figura 50 – Gráficos de pareamento – Apartamento 03

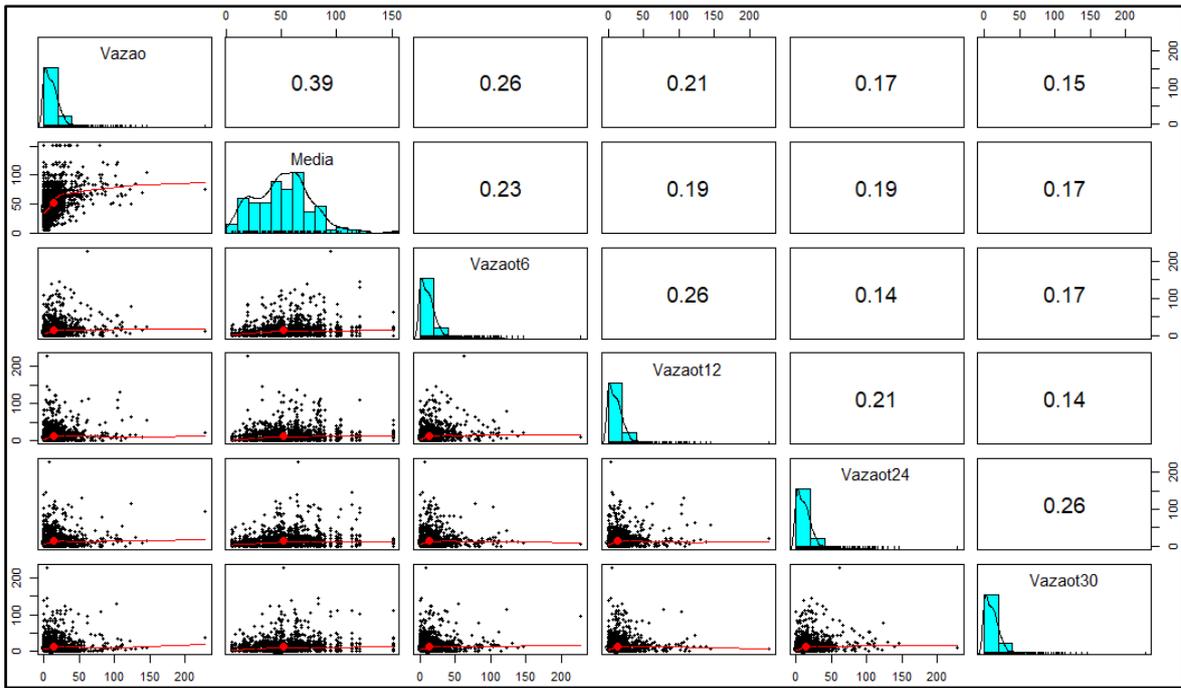


Figura 51 – Gráficos de pareamento – Apartamento 04

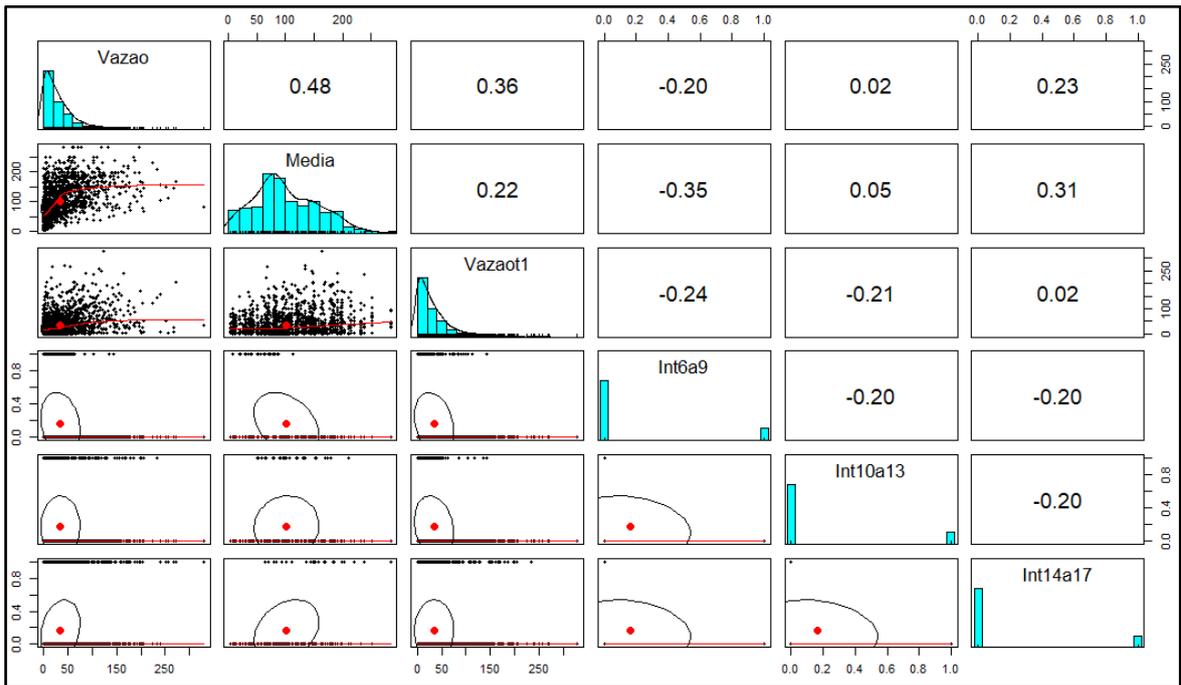


Figura 52 – Gráficos de pareamento – Casa A 01.

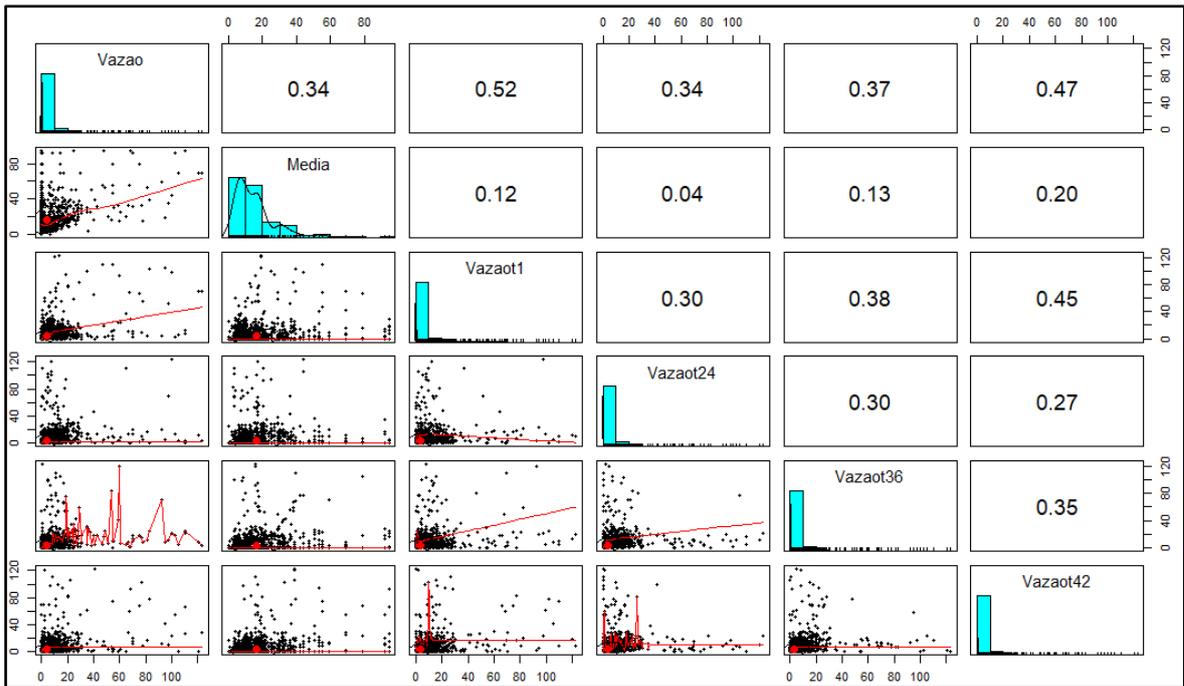


Figura 53 – Gráficos de pareamento – Casa A 02.

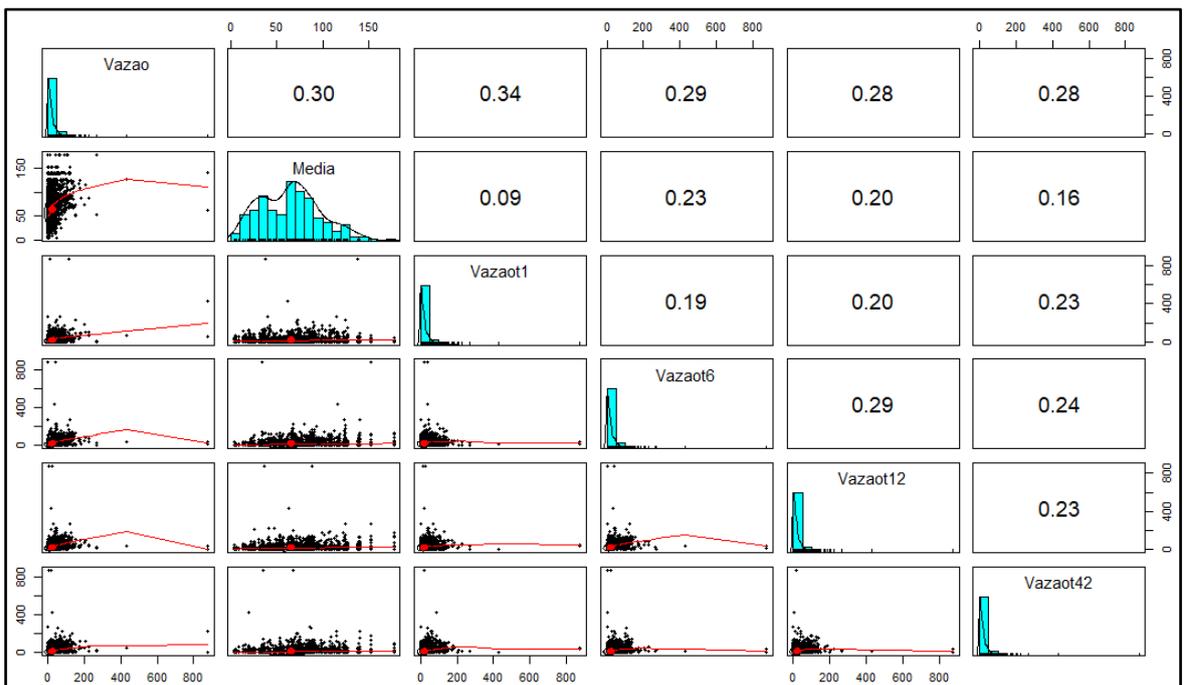


Figura 54 – Gráficos de pareamento – Casa B 01.

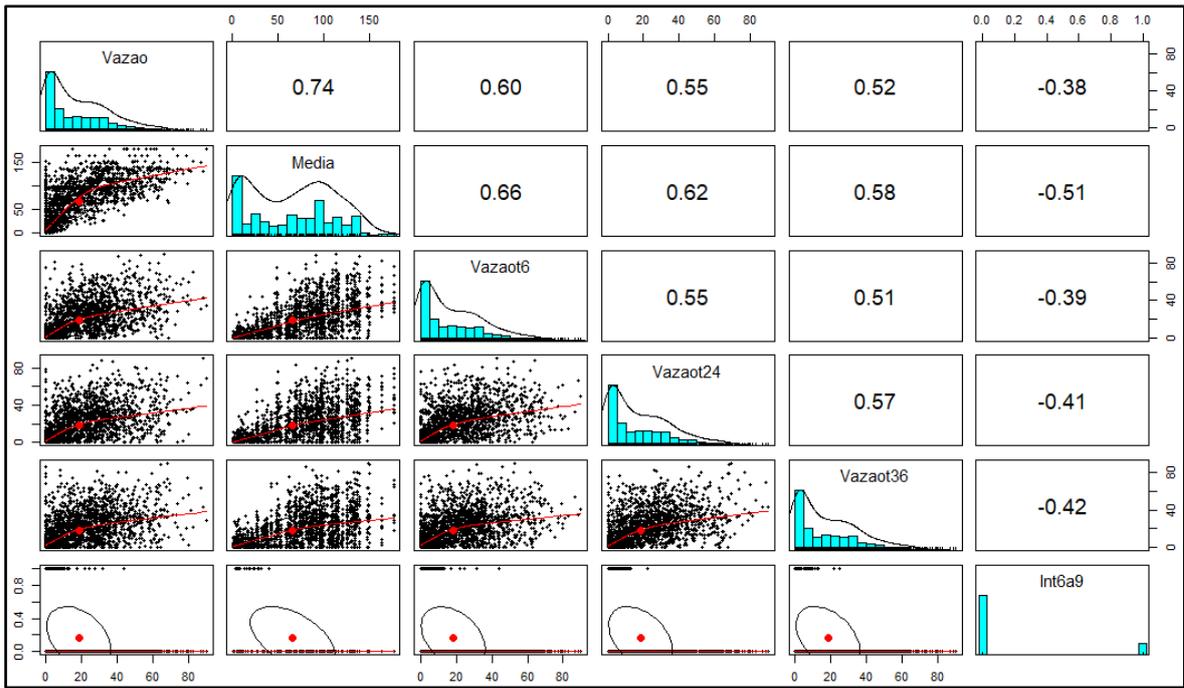


Figura 55 – Gráficos de pareamento – Casa B 02.

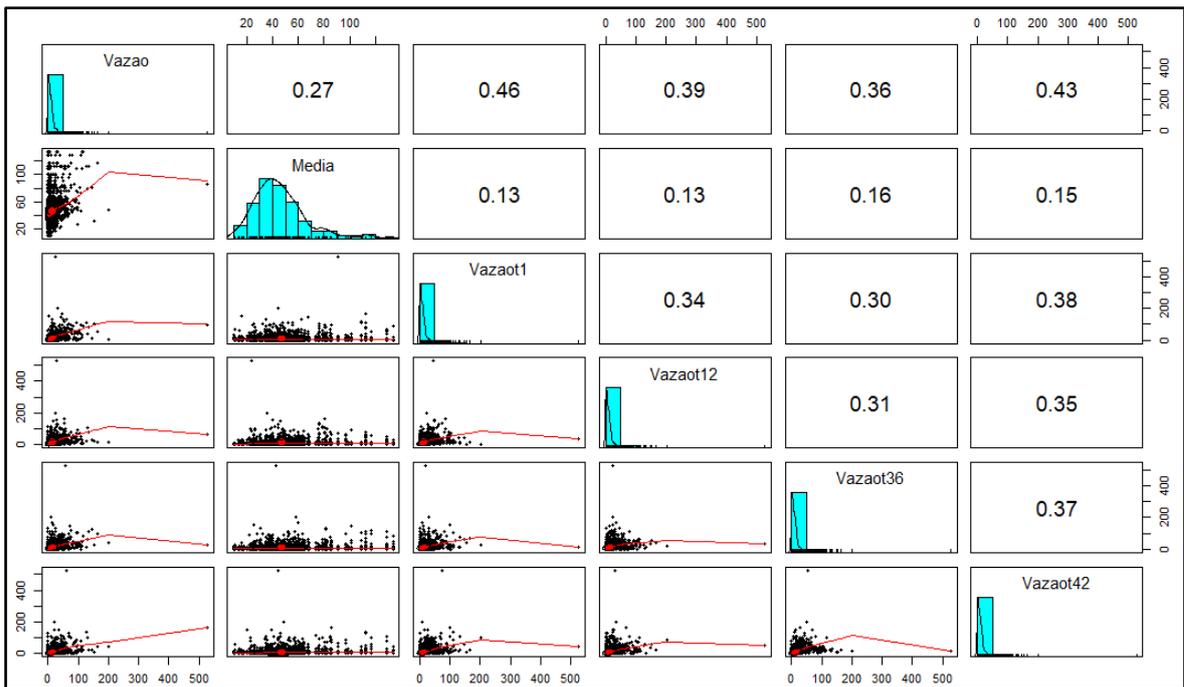


Figura 56 – Gráficos de pareamento – Casa B 03.

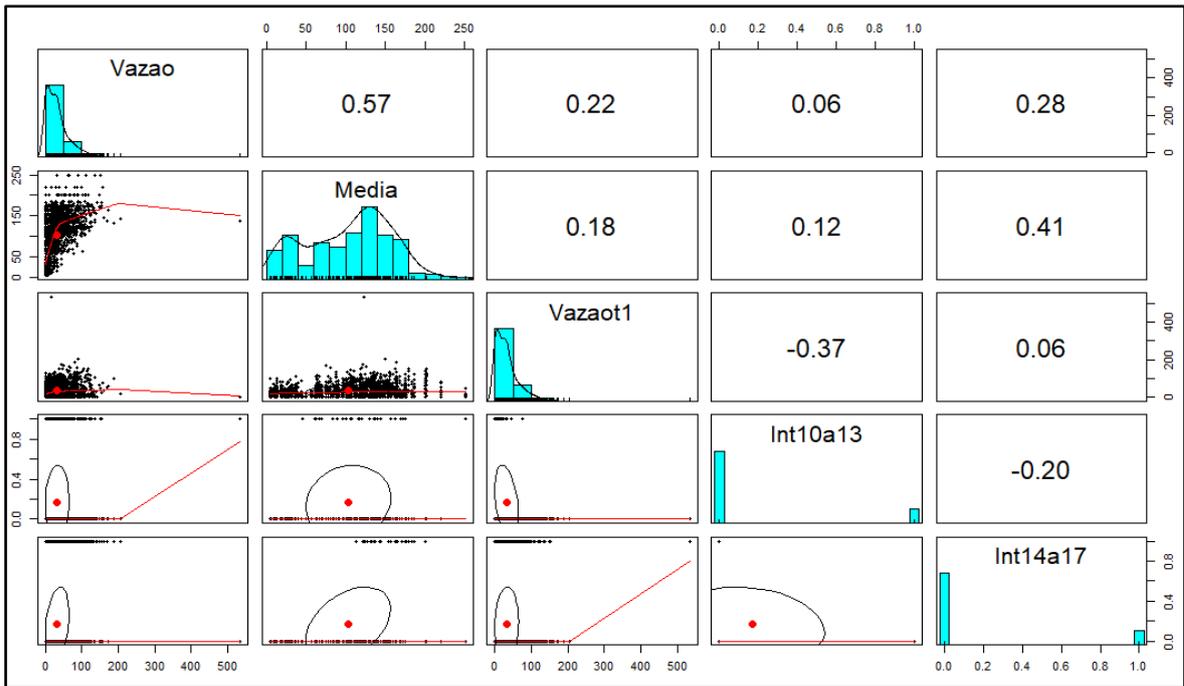


Figura 57 – Gráficos de pareamento – Casa B 04.

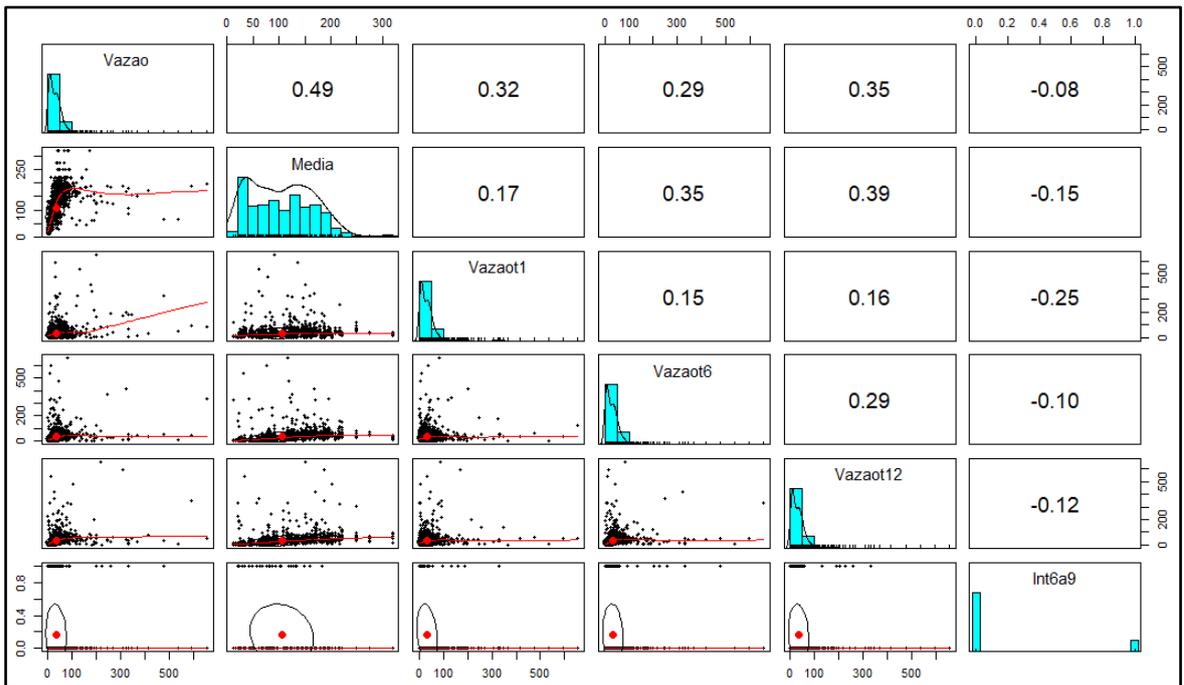


Figura 58 – Gráficos de pareamento – Portaria.

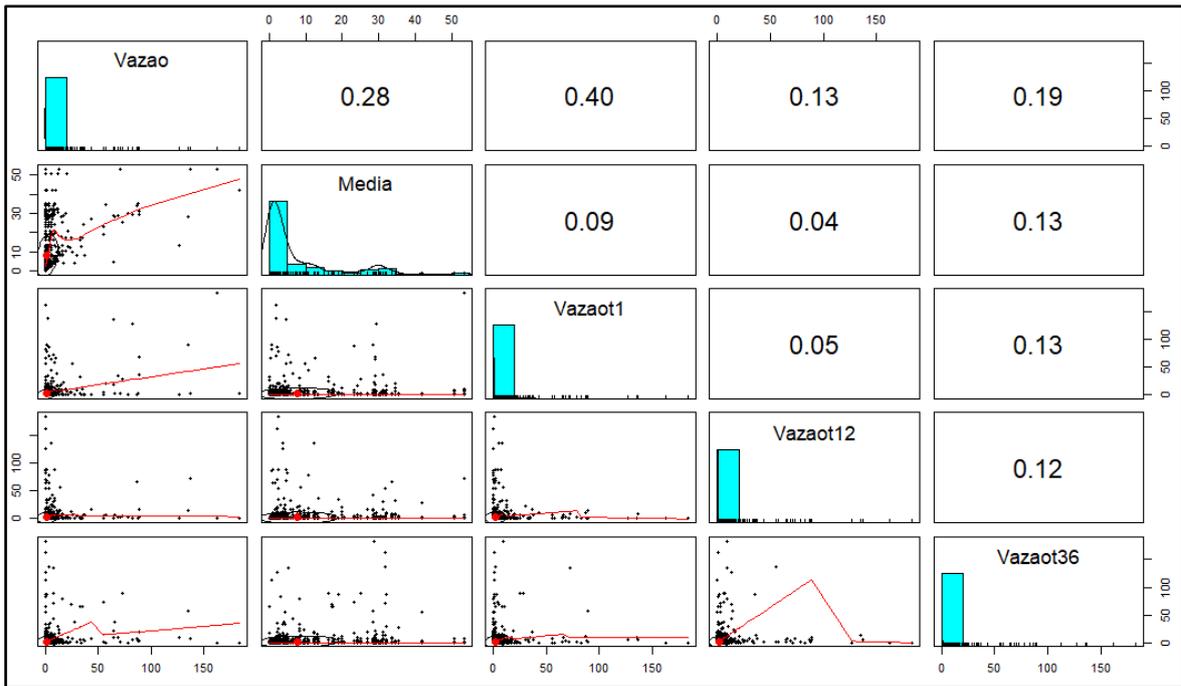


Figura 59 – Gráficos de pareamento – Churrasqueira.

Da análise dos resultados apresentados é possível identificar que o  $R^2$  ajustado variou entre 0,20 e 0,58, enquanto do RME variou entre 8,52 e 35,33. Também é possível inferir que o melhor desempenho do modelo se deu para a unidade Casa B 02 (maior valor de  $R^2$  ajustado), muito provavelmente devido à relativamente baixa variabilidade e a baixa incidência de períodos em que não houve consumo.

Para todos os modelos, isto é, para todas as unidades, a vazão de consumo média, de acordo com a hora, foi selecionada como variável explicativa, o que demonstra importância destes valores para avaliação do consumo das unidades do condomínio.

A explicação para aparecimento de modelos com resultados onde se constata baixo  $R^2$  ajustado e baixo RME se relaciona, muito provavelmente, com a existência de grandes períodos sem consumo computado, mas que seguem algum tipo de padrão, o que pode ser observado nos resultados da área comum referente à Churrasqueira, quando o consumo é apurado principalmente aos finais de semana.

Em relação ao RME, os piores resultados parecem estar conexos não só com variabilidade do consumo, mas também com a presença de pontos fora da curva, o que pode sugerir a existência de vazamentos nas instalações da unidade durante o período analisado. Tal fato

pode ser observado para as instalações de área comum da Portaria e da Churrasqueira, e para Casa B 01. Recomenda-se, portanto, que os modelos sejam aplicados após tratamento de pontos fora da curva e, assim como nos modelos anteriores, apenas para os períodos de consumo.

Para todos os modelos foram obtidos resultados com desempenhos superiores à adoção da média ou da última observação, contudo, é preciso destacar que os resultados são prejudicados pelo padrão estocástico do consumo das unidades.

#### **5.4 BALANÇO HÍDRICO DA ÁREA DE ESTUDO**

Na sequência, nos itens 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3, são apresentados os resultados da realização do balanço hídrico com utilização de um DMC temporário para área de estudo, a partir dos dados de consumo oriundos do sistema de telemetria e a partir da instalação de um medidor de vazão na saída do reservatório do condomínio.

Inicialmente foram determinados os consumos das unidades para o período em que o medidor de vazão foi instalado e posteriormente foram estimadas as perdas reais, realizado o balanço hídrico e estimados os indicadores de perda aparente.

##### **5.4.1 Determinação do Consumo do Condomínio**

Os consumos apurados para as unidades do condomínio são apresentados na Figura 60, onde é possível comparar o consumo total do condomínio com o volume de entrada, verificado pelo medidor de vazão. Para 40 unidades do condomínio houve problema de comunicação em pelo menos um dos dias do período estudado. Nestes casos, para possibilitar a determinação do balanço hídrico, foi estimado o consumo diário, conforme consumo mensal apurado, ou média de consumo mensal, para casos em que o consumo mensal não havia sido informado. Considera-se que a variação do nível do reservatório não impacta na utilização de água das unidades, visto que o volume disponível é capaz de suprir aproximadamente 3 dias de consumo do condomínio e não houve eventos de falta d'água no período estudado.

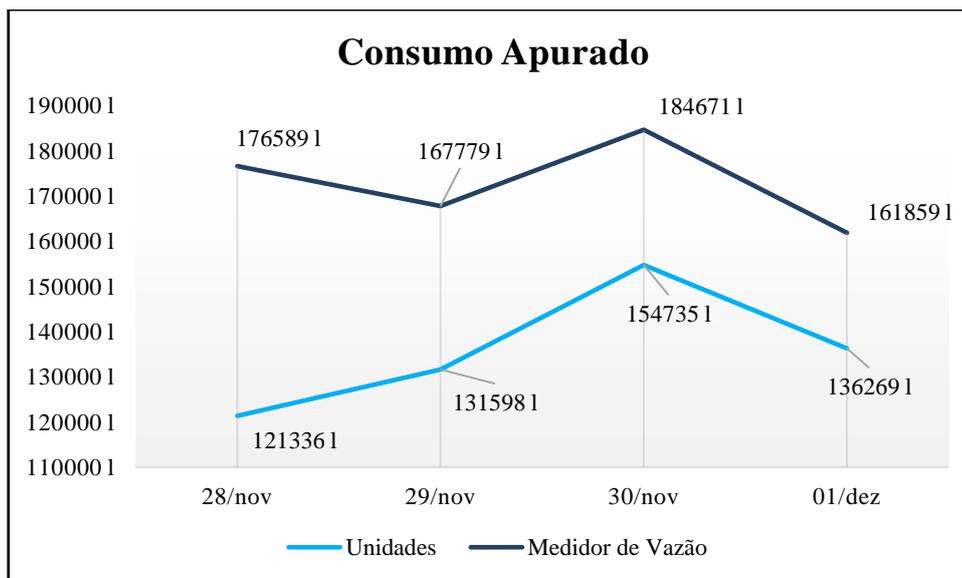


Figura 60 – Evolução do Consumo do Condomínio (28/11/2020 a 01/12/2020).

Na Tabela 30, estão apresentados os volumes de entrada (Medidor de Vazão), o consumo do condomínio (somatório dos consumos das Unidades), e diferença entre os dois:

Referências	Data				Total
	28/11/2020	29/11/2020	30/11/2020	01/12/2020	
Medidor de Vazão	176589 (l)	167779 (l)	184671 (l)	161859 (l)	690898 (l)
Unidades	121336 (l)	131598 (l)	154735 (l)	136269 (l)	543938 (l)
Diferença	55253 (l)	36181 (l)	29936 (l)	25590 (l)	146960 (l)

Tabela 30 – Consumo do condomínio no período de estudo.

A partir da avaliação da Figura 59 e da Tabela 29 é possível verificar o decréscimo da diferença ao longo do intervalo analisado. Nos dois primeiros dias, que são dias de final de semana, há maior distância entre volume de entrada e volume consumido nas unidades, computados pelos hidrômetros individualizados.

Dado que não houve detecção de perdas reais no período e tampouco substituição de hidrômetros ou atividades de manutenção do sistema de telemetria, é provável que a diferença esteja relacionada à existência de pontos de consumo não hidrometrados, cuja maior frequência de utilização é aos fins de semana.

### 5.4.2 Estimativa de Perdas Reais

Da modelagem da rede de abastecimento do condomínio resultaram, para o consumo máximo e para o consumo mínimo, as pressões que constam nas Figuras 61 e 62 respectivamente.

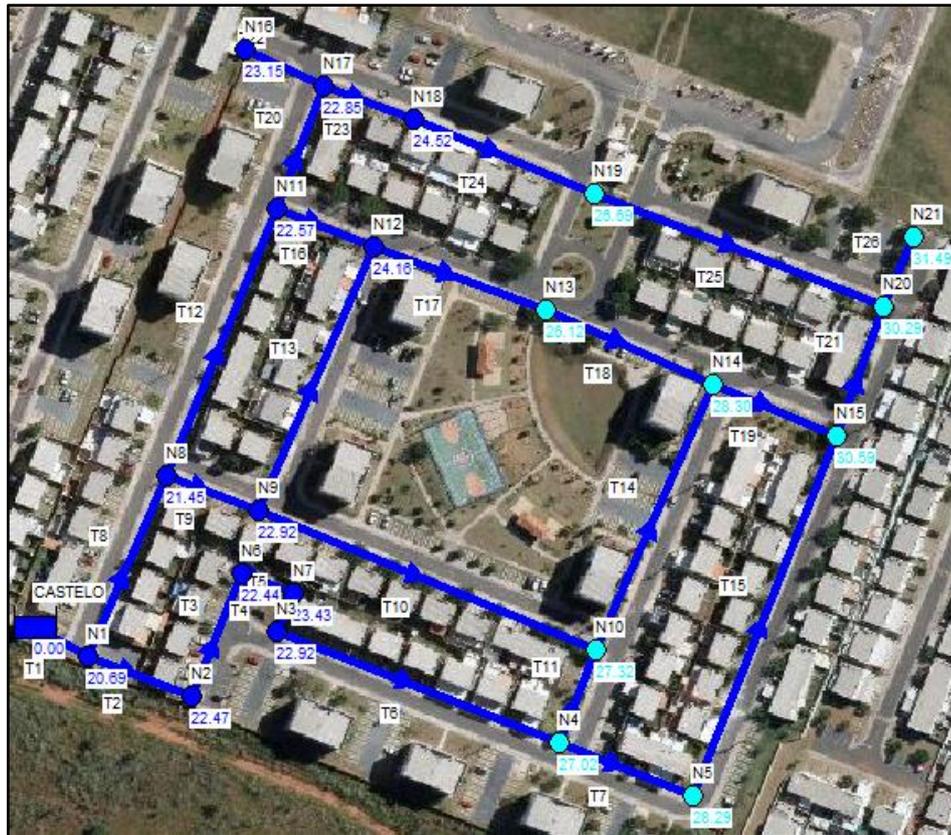


Figura 61 – Pressões nos nós (consumo máximo)

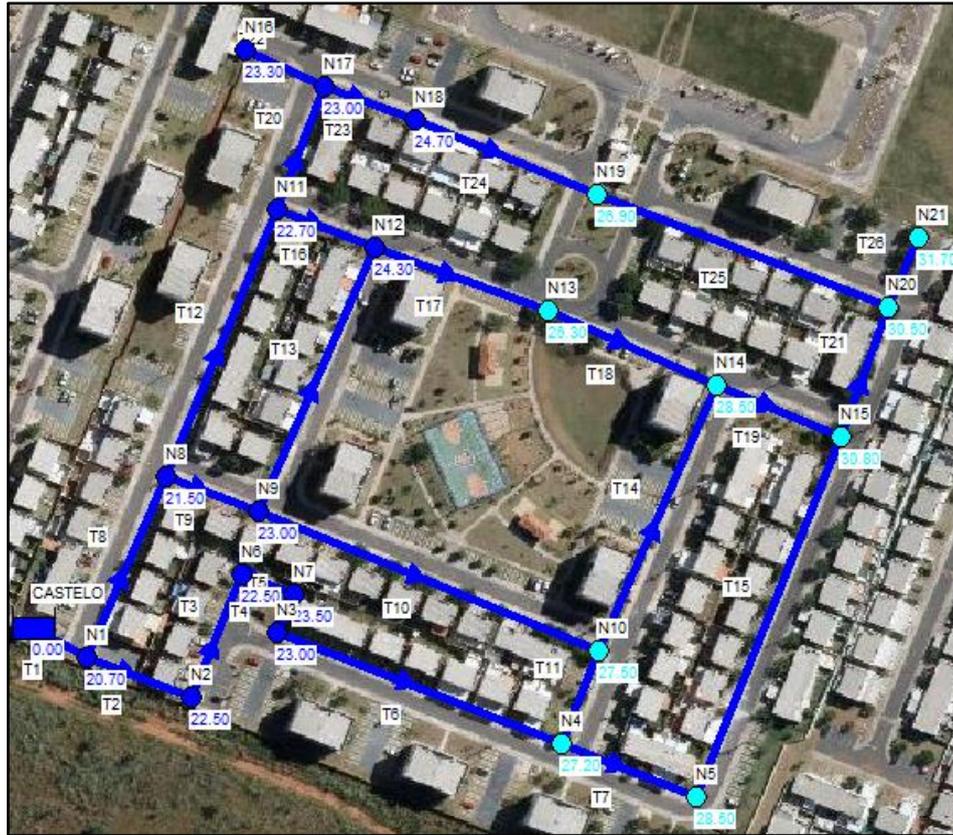


Figura 62 – Pressões nos nós (consumo mínimo)

A maior variação de pressão percentual foi de 1,44%, obtida para o Nó 16, enquanto a maior variação absoluta foi de 0,36 metros de coluna d'água e obtida para o Nó 19. Em média, a variação percentual de pressões foi de 0,93%, já a variação média absoluta foi de 0,24 metros de coluna d'água. Os resultados confirmam a assunção feita para obtenção do sistema não linear de equações, proposto em (20).

Com os resultados obtidos em 5.4.1, foi possível determinar o volume médio noturno e o volume médio diário de água que entrou no condomínio (frequência de dois minutos, conforme item 4.3.1) e, a partir desses dados, solucionar o sistema não linear de equações (20), proposto por Mazzolani (2016), obtendo valores para K e para o valor médio do volume de vazamentos na rede. Os parâmetros e resultados dos cálculos estão apresentados na na formulação a seguir e na Tabela 31.

$$\left\{ \begin{array}{l} 245,26K - KL_N + L_N = 92,71 \\ 233,03K - KL_N + L_N = 85,46 \\ 256,49K - KL_N + L_N = 80,08 \\ 224,80K - KL_N + L_N = 62,69 \end{array} \right.$$

Referências	Data			
	28/11/2020	29/11/2020	30/11/2020	01/12/2020
Volume médio dia	245,26 (l)	233,03 (l)	256,49 (l)	224,80 (l)
Volume médio noturno	92,71 (l)	85,46 (l)	80,08 (l)	62,69 (l)
Resultados	<b>K</b>	0,279	<b>V. Vazamento</b>	0,00 (l)

Tabela 31 – Parâmetros e resultados do sistema não linear, proposto por Mazzolani (2016).

A solução resultou em ausência de perdas reais na rede estudada, contudo, é improvável que essa seja a realidade da rede. É muito provável que o resultado tenha sido afetado pelo curto período de análise, que coincide com o tempo de instalação do medidor de vazão, e pelo baixo volume de perdas reais na rede.

Para o método das vazões mínimas noturnas, foi calculado o resultado da subtração entre vazão mínima noturna para o período estudado e o consumo mínimo noturno, determinado conforme AESBE (2015). Utilizou-se uma população média de 2,5 habitantes por residência e o total de 100 ramais, conforme quantidade de edificações. Os resultados estão apresentados na Tabela 32.

Vazão Mínima Noturna (l/h)	Consumo Mínimo Noturno (l/h)	Perdas Reais (l/h)
968,40	407,00	561,40

Tabela 32 – Resultados da estimativa pelas Vazões Mínimas Noturnas.

Ante baixa variação das pressões na rede, o volume diário de perdas pode ser estimado com a multiplicação da perda real horária por 24 horas, o que resulta em 13.473,60 litros por dia.

Considerando o consumo diário médio de 172.724,50 litros, obtêm-se o percentual de 7,80% para as perdas reais do condomínio. O resultado indica bom estado de conservação das redes do condomínio, o que já era esperado, dada sua pouca idade e o acompanhamento dos consumos por medição remota. Contudo, é necessário sublinhar que o resultado pode sofrer distorções em função do consumo *per capita*.

### 5.4.3 Estimativa dos Indicadores de Perda

Inicialmente, a partir do DMC temporário e dos resultados apresentados nos itens 5.4.1 e 5.4.2, foi construído o Balanço Hídrico do condomínio, reproduzido na Figura 63 (Por se tratar de uma rede relativamente pequena e de baixa complexidade, muitas variáveis da matriz proposta pela IWA são suprimidas):

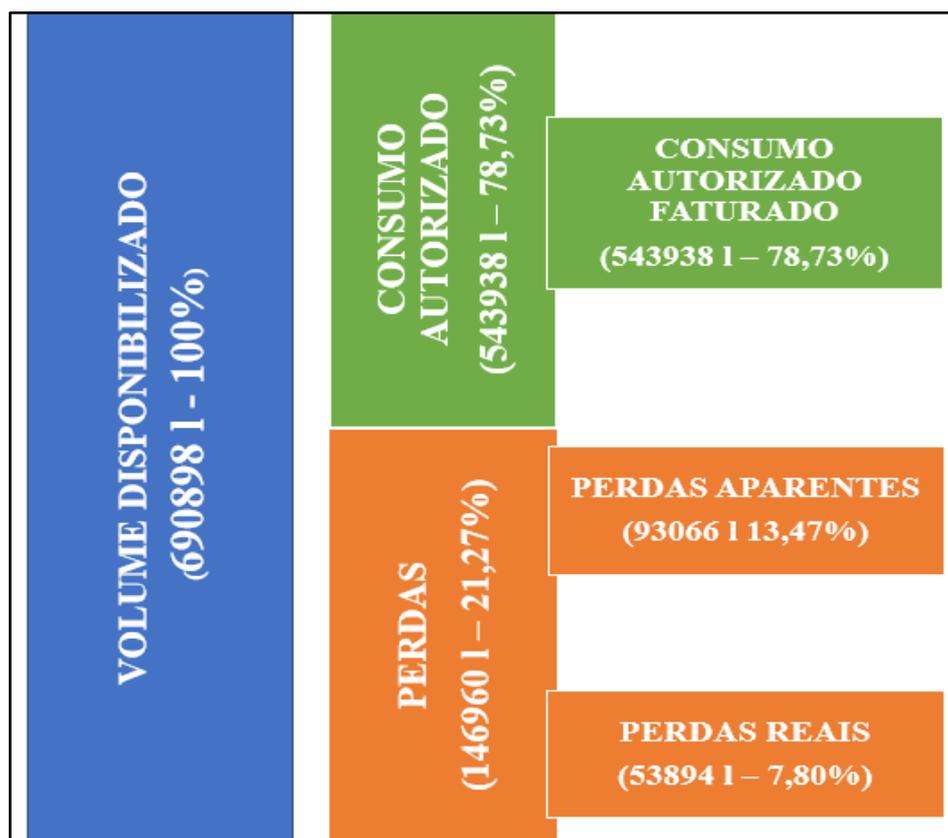


Figura 63 – Balanço Hídrico do Condomínio (DMC temporário)

A partir dos resultados, de acordo com o proposto no item 4.5.3, foram estimados os indicadores de perdas, são eles: o Índice de Perdas na Distribuição (IP), o Índice de Perdas por Ligação (IL), o Índice de Vazamentos da Infraestrutura (IVI) e o Índice de Perdas Aparentes (IVA). Na sequência é apresentada a Tabela 33, onde constam os resultados obtidos para o condomínio e, a título de comparação, os apresentados no Balanço Hídrico da Caesb de 2020 e a média nacional que consta no SNIS, ano de 2019.

Referência	IP	IL	IVI	IPA
Condomínio	21,27%	86,86 l/lig./dia	3,61	2,69

Caesb (2020)	32,10%	297,57 l/lig./dia	4,10*	1,53*
SNIS (2019)	39,24%	339,48 l/lig./dia	Não disponível	Não disponível

\*Calculados a partir de dados disponíveis.

Tabela 33 – Indicadores de Perdas

Os resultados sugerem que, em termos de perda de água, a rede de abastecimento do condomínio está em boas condições quando comparada à realidade do Distrito Federal e do Brasil. Os indicadores demonstram que a região não deve ser priorizada para trabalhos de redução de perdas, sistematicamente realizados pela Caesb. Sobre o IPA, constataram-se resultados piores do condomínio, quando comparado à realidade do Distrito Federal. É possível atribuir essa situação à faixa de consumo do condomínio, que tem unidades de baixo consumo e, diferentemente dos grandes consumidores, a submedição nesses casos impactam menos no Balanço Hídrico do DF, pois se referem à volumes menores para um percentual de perda aparente mais elevado.

Como já mencionado, o resultado era esperado, em vista da idade da rede e do controle obtido após implantação da medição remota do consumo.

Também importante salientar que ao comparar os indicadores, é possível determinar qual é a viabilidade econômica dos serviços e, conseqüentemente, priorizar a alocação de recursos para o combate das perdas reais e/ou das perdas aparentes. Para o condomínio, evidencia-se maior potencial de recuperação nos serviços de combate das perdas aparentes.

## 5.5 SISTEMA DE ALARME DE VAZAMENTOS E FALHAS NA MEDIÇÃO

Como informado no item 4.6, o sistema de alarme foi desenvolvido com auxílio da ferramenta gratuita “*Data Studio*” e tem como fundamento o que dispõe os itens 4.6.1, 4.6.2 e 4.6.3, que levam em consideração a média móvel de consumo para um período de uma semana e os coeficientes da metodologia CFPD (equação 21). (Extratos das bases de dados utilizadas para desenvolvimento do sistema de alarme de vazamentos são apresentados no Apêndice C).

Assim, na sequência (Tabela 34) são apresentados os resultados obtidos, dentre os quais se destacam a quantidade de eventos de consumo acima do esperado por unidade, e a quantidade de eventos de consumo abaixo do esperado por unidade.

<b>Unidade</b>	<b>Eventos de Consumo Acima do Esperado</b>	<b>Eventos de Consumo Abaixo do Esperado</b>
Apartamento 01	00	00
Apartamento 02	00	00
Apartamento 03	01	00
Apartamento 04	03	00
Casa A 01	04	00
Casa A 02	03	05
Casa B 01	10	04
Casa B 02	01	01
Casa B 03	03	02
Casa B 04	02	00
Portaria	01	00
Churrasqueira	08	06
<b>TOTAIS</b>	<b>36</b>	<b>18</b>

Tabela 34 – Resultados obtidos: quantidade de eventos por unidade

É possível identificar unidades com maior quantidade de eventos, tanto de consumo abaixo do esperado quanto de consumo acima do esperado (Casa A 02, Casa B 01 e Churrasqueira). São unidades com uso de água esporádico, que podem levar a análises equivocadas se os eventos forem considerados isoladamente. Para esses casos é necessário avaliar apenas os dias de consumo.

Adicionalmente, são apresentadas telas do sistema (Figuras 64 e 65), onde é possível avaliar a evolução do consumo, a evolução da média móvel (para 7 dias), e a evolução do indicador de consumo, tanto para todas as unidades agrupadas e para uma unidade específica. Destaca-se que o sistema permite filtrar as informações por unidade consumidora, por período de interesse, por semana do ano, e pelo valor do indicador de consumo.

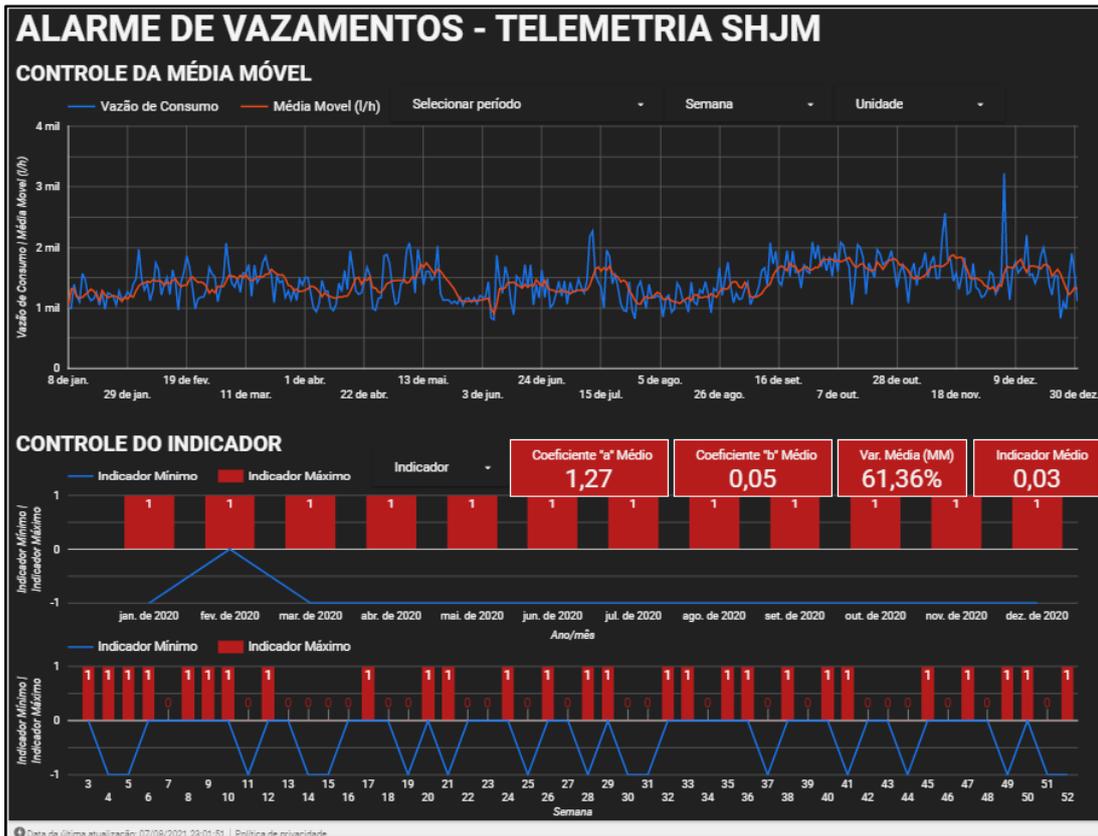


Figura 64 – Sistema de Alarme de Vazamentos – Unidades Agrupadas

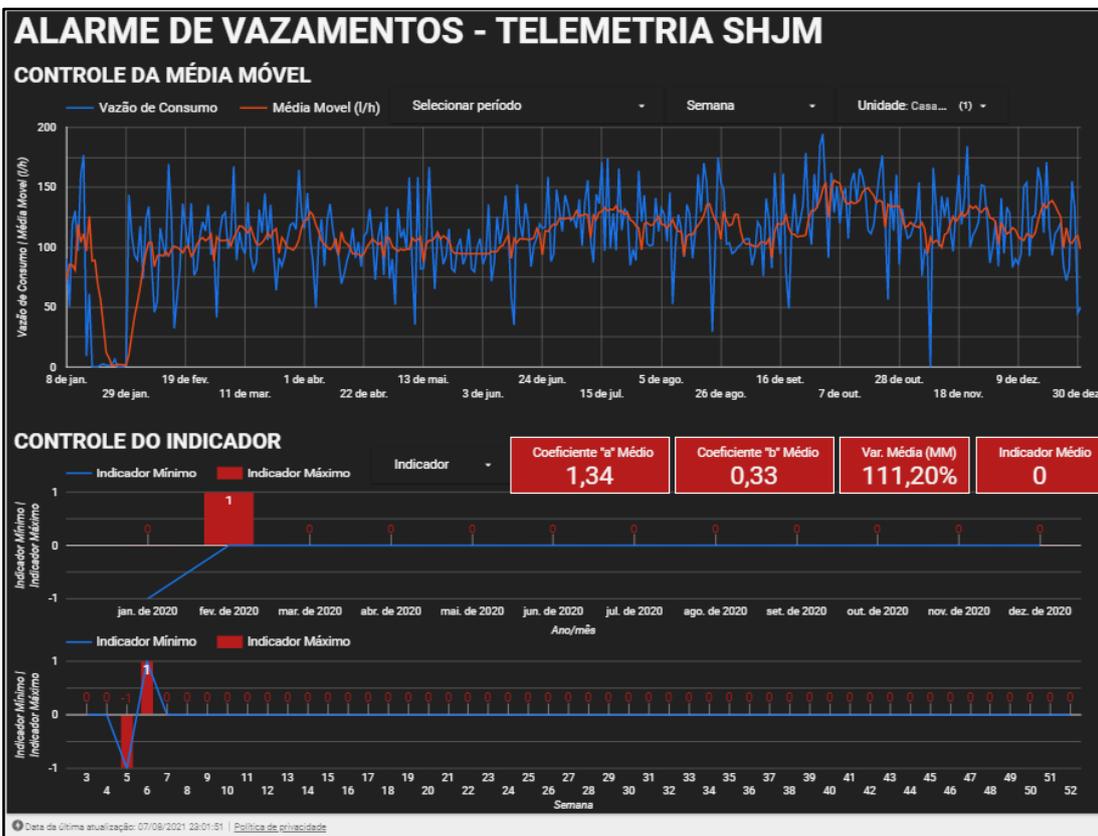


Figura 65 – Sistema de Alarme de Vazamentos – Casa B 02

Para verificar o funcionamento do sistema de alarme, foram localizadas no sistema de gestão comercial da Caesb, reclamações de revisão de conta e solicitações suspensão e religação do fornecimento, contudo, para o período de análise, foi identificada apenas uma reclamação de revisão de fatura, trata da unidade Casa B 01, no mês de maio de 2020. A alteração de consumo é apontada pelo sistema de alarme, mostrando seu correto funcionamento. Todavia, vazamentos que não geram reclamações e/ou que são rapidamente solucionados pelas unidades não são computados pelo sistema da prestadora de serviços e, portanto, demandam uma avaliação específica, envolvendo necessário acompanhamento das instalações internas das unidades.

Importante também salientar que o sistema foi capaz de identificar variações do perfil de consumo das unidades, o que foi comprovado com a análise dos históricos de leituras do sistema comercial da Concessionária e pode ser verificado na Figura 65 (meses de janeiro e fevereiro).

Finalmente, destaca-se que os valores médios dos coeficientes, da variação da média móvel, e do indicador médio sugerem o comportamento do consumo das unidades, refletindo a instabilidade ou a estabilidade. Valores médios próximos de um para o coeficiente “a”, próximos de zero para o coeficiente “b”, para variação da média móvel e para o indicador médio, revelam estabilidade do consumo, enquanto valores distantes de um para o coeficiente “a”, distantes de zero para o coeficiente “b”, para a variação da média móvel e para o indicador médio, revelam instabilidade do consumo.

## **6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Considerando os objetivos inicialmente propostos, o presente trabalho realizou a avaliação qualitativa e quantitativa dos benefícios da implantação do sistema de leitura remota. Também, no mesmo contexto, foi feita a modelagem do consumo de água para uma amostra de hidrômetros das unidades do condomínio, possibilitando trabalhos que visem a otimização da operação, manutenção e dimensionamento das redes. Ainda, foi constituído o DMC temporário, possibilitando a determinação do balanço hídrico para rede de distribuição e, finalmente, foi elaborado sistema de alarme de vazamentos para as unidades individuais

amostradas, que podem contribuir para o programa de combate as perdas e oferecer novo serviço ao usuário.

A avaliação qualitativa dos benefícios da medição remota foi baseada no trabalho de Monks et al. (2020), com aplicação da pesquisa à realidade do caso de estudo. Já o estudo quantitativo utilizou como referência, além do trabalho supramencionado, o custo de operação, obtido junto à concessionária, além da elaboração de uma distribuição de frequência dos benefícios e uma Simulação de Monte Carlo, que resultou em prováveis retornos financeiros da implantação do sistema de medição inteligente, para dois cenários distintos: o primeiro sem o desenvolvimento das ferramentas propostas neste trabalho, e o segundo com o desenvolvimento. O segundo cenário mostrou um incremento no retorno financeiro do projeto, sendo o valor estimado superior ao do primeiro cenário em mais do que 8 vezes.

A modelagem do consumo foi baseada em três modelos: o modelo ARIMA, o modelo SARIMA e a Regressão Linear Multivariada. Os dois primeiros modelos utilizam parâmetros de autorregressão e de média móvel, sendo a diferença entre eles a utilização do parâmetro de sazonalidade no último caso. Já a Regressão Linear Multivariada utiliza a relação linear entre variáveis explicativas (independentes) e variável dependente para estimar os valores de consumo observados. Todos os modelos apresentaram bons resultados e se mostraram funcionais com a utilização de dados de telemetria.

Na determinação do DMC temporário foi instalado medidor de vazão na tubulação de alimentação da rede de distribuição do condomínio. A partir daí foram estimadas as perdas reais com o método proposto por Mazzolani et al. (2016) e com o método de mínima vazão noturna. Estimadas as perdas reais e subsidiado pelos dados de consumo do sistema de telemetria, foram estimadas as perdas aparentes, construído o balanço hídrico do condomínio, e determinados os indicadores de perdas. As estimativas permitem identificar a situação rede avaliada e determinar as prioridades do combate às perdas de água.

Finalmente, também a partir dos dados de consumo informados pelo sistema de telemetria, foi desenvolvido sistema de alarme de vazamentos, que utilizou conceitos de média móvel e do método de Comparação entre Padrões de Distribuição de Vazão (CFPD, proposto por

Van Thienen – 2013). O sistema, que trata de um novo serviço que pode ser oferecido aos usuários após implantação de leitura remota, permite a gestão da rede hidráulica interna das unidades consumidoras.

Ante o exposto ao longo dos capítulos deste trabalho, é possível concluir e recomendar o que segue:

1. Dada quantidade de dados produzidos, recomenda-se aplicação de ferramentas de inteligência artificial e aprendizado de máquina para avaliação dos consumos, visando melhoras nos resultados da modelagem do consumo;
2. Os benefícios da medição inteligente não se restringem a leitura remota, como visto no item 5.1, há impacto positivo na gestão financeira, no custo da prestação do serviço de abastecimento, no custo de utilização do serviço de abastecimento, e na segurança dos usuários. Contudo, é importante salientar que o atingimento de todos os benefícios que a medição remota proporciona depende do desenvolvimento de todos os requisitos, descritos no trabalho;
3. A modelagem dos consumos apresentou bons resultados, contudo, restou prejudicada para casos em que houve longos períodos sem consumo e variância elevada;
4. Na comparação entre os modelos ARIMA e SARIMA, o segundo apresentou melhores resultados. Os resultados dos modelos SARIMA, em geral, também foram superiores aos resultados dos modelos de Regressão Linear Multivariada;
5. Restou demonstrada a possibilidade de utilizar DMCs temporários, com auxílio dos dados de medição remota, para avaliar perdas e definir prioridades no seu combate;
6. A utilização do DMC temporário revelou que a rede de distribuição do condomínio está em boas condições, apontando para priorização no combate às perdas aparentes;
7. O presente trabalho revela a possibilidade da prestação de um novo serviço aos usuários: o alarme de vazamentos. Trata de serviço que melhora a relação entre usuário e prestador, que tem sua imagem institucional aprimorada com o aumento da confiabilidade;
8. O sistema de alarme de vazamentos se mostrou funcional, utilizando metodologia relativamente simples. Contudo, é necessário testar também o sistema tendo acesso às instalações internas das unidades, visto que vazamentos que não geram reclamações e/ou que são rapidamente solucionados pelas unidades não são computados pelo sistema comercial da prestadora de serviços;

9. O sistema de alarme de vazamentos se mostrou capaz de detectar mudanças no perfil de consumo das unidades, como períodos sem uso de água, elevação do patamar de consumo, entre outros;
10. A modelagem do consumo, a adoção de DMC temporário e de sistemas de alarme de vazamentos, desenvolvidos neste trabalho, podem ser utilizadas nos novos projetos de medição inteligente da concessionária.

Por último, são possibilidades de novos trabalhos:

- Desenvolvimento de pesquisa dos impactos da medição remota no cenário regional, considerando os sistemas já implantados, para desenvolvimento de nova avaliação qualitativa e quantitativa;
- Aplicação de ferramentas de AI e aprendizado de máquina aos dados e séries temporais de consumo obtidos pelos sistemas de medição remota do Distrito Federal, visando aprimorar os resultados da modelagem;
- Estudo do sistema de alarme de vazamentos sob uma perspectiva do usuário, isto é, a partir de uma abordagem que considere as instalações hidráulicas prediais das unidades, e considerando novos critérios para disparo dos alarmes;
- Comparação econômica e técnica entre as possíveis frequências de transmissão de dados, considerando períodos mais longos e mais curtos entre leituras dos medidores, quando comparados com o período do caso de estudo do presente trabalho;
- Aplicação do DMC temporário a outras redes de distribuição do Distrito Federal, otimizando os trabalhos de combate às perdas reais e aparentes;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABES (2015) *Controle e Redução de Perdas nos Sistemas Públicos de Abastecimento de Água*. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, Brasília-DF.

ADASA. Resolução nº 15, de 10 de novembro de 2011, que estabelece os procedimentos para a instalação de hidrômetros individualizados em condomínios verticais residenciais e de uso misto no Distrito Federal. Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal – ADASA, Brasília-DF.

AESBE (2016) *Guia Prático para Método Direto de Quantificação de Perdas Reais em Sistemas de Abastecimento*. Associação Brasileira de Empresas Estaduais de Saneamento – AESBE, Brasília-DF.

ANELE, A.O.; HAMAM, Y.; ABU-MAHFOUZ, A.M.; TODINI, E. (2017) *Overview, Comparative Assessment and Recommendations of Forecasting Models for Short-Term Water Demand Prediction*. *Water* 09, pp. 887-898.

ARBUÉS, F.; GARCÍA-VALIÑAS, M. A.; MARTINEZ-ESPIÑERA, R. (2002) *Estimation of residential water demand: a state-of-the-art review*. *Journal of Socio-Economics* 32, pp. 81-102.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8009: Hidrômetro taquimétrico para água fria até 15,0 m<sup>3</sup>/h de vazão nominal - Terminologia*. Rio de Janeiro, 1997.

BORGES, V.M.N.A; *Acoplamento de um modelo de previsão de demanda de água a um modelo simulador em tempo real - Estudo de caso: sistema adutor metropolitano de São Paulo*. 2003. 232 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.

BRASIL. Lei Distrital nº 4.383, de 28 de Julho de, 2009. Altera a Lei nº 3.557, de 18 de janeiro de 2005, que dispõe sobre a individualização de instalação de hidrômetro nas edificações verticais residenciais e nas de uso misto e nos condomínios residenciais no Distrito Federal.

BUCHBERGER, S.G; WU, L. (1995). *Model for instantaneous residential water demands* *Journal of Hydraulics Engineering* 121 (3). pp. 232-246.

CAESB. Licitação Pública Nacional nº 018/2018, de julho de 2018, para execução dos serviços de elaboração de projeto executivo, implantação, operação e manutenção remota de hidrômetros e corte remoto do abastecimento de água nas unidades habitacionais do condomínio residencial Jardins das Mangabeiras, no Jardins Mangueiral. Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – Caesb, Brasília-DF.

CAESB (2019). *Demonstração Financeira Caesb – 2019*. Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – Caesb, Brasília-DF.

CASTRO, K.B. (2018) *Consumo de Água do Distrito Federal por Região Administrativa*. Texto para Discussão - CODEPLAN-DF.

CARPENTIER, P.; COHEN, G. (1991) *State estimation and leak detection in water distribution networks*. Civil Engineering Systems 8. pp. 247-257.

COMINOLA, A.; MONKS, I.; STEWART, A. (2020) *Smart Water Metering and AI for Utility Operations and Customer Engagement: Disruption or Incremental Innovation?* hydro link 4/2020 pp. 114-119.

DAVIDSON, J. W.; BOUCHART, F.J.C. (2006). *Adjusting nodal demand in SCADA constrained real-time water distribution network models*. Journal of Hydraulics Engineering 132 (1). pp. 102-110.

DE LA CRUZ, A.O.; ALVAREZ-CHAVEZ, C.R.; RAMOS-CORELLA, M.A.; SOTO-HERNANDEZ, F. (2016) *Determinants of domestic water consumption in Hermosillo, Sonora, Mexico*. Journal of Cleaner Production 142, pp. 1901-1910.

DIAS, T.F.; KALBUSCH, A.; HENNING, E. (2017) *Factors influencing water consumption in buildings in southern Brazil*. Journal of Cleaner Production 184, pp. 160-167.

DOMENE, E.; SAURÍ, D. (2006) *Urbanization and water consumption: influencing factors in the metropolitan region of Barcelona*. Urban Studies 88, pp. 1605-1623.

FILHO, N.A.C.; *Avaliação de Medidores com Múltiplas Tomadas de Pressão na Macromedição em Sistemas de Água*. 2007. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista - Unesp. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Departamento de Engenharia Civil.

FILHO, N.A.C.; DALL'AGLIO, M. (2006) *Avaliação de Medidores de Vazão com Múltiplas Tomadas de Pressão na Macromedição em Sistemas de Abastecimento de Água*. Revista DAE 178, pp. 40-47.

GONÇALVES, E.; *Metodologias para controle de perdas em sistemas de distribuição de água – estudo de casos da Caesb*. 1998. 192 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília - UnB. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil.

GUIDI, J.M.J; *Análise da variação do consumo de água utilizando dados obtidos por sistemas supervisores remotos – estudo de caso: município de Franca-SP*. 2016. 92 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Campinas - Unicamp. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

HITCHCOCK, R.T. (2004). *Radio-Frequency and Microwave Radiation*. American Industrial Hygiene Association, 49 p.

INMETRO. Portaria nº 295, de 29 de junho de 2018, que aprova o Regulamento Técnico Metrológico (RTM) estabelecendo as condições que devem satisfazer os medidores para água potável fria e água quente, doravante denominados medidores de água. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO, Brasília-DF.

IRAR – Instituto Regulador de Águas e Resíduos *Controlo de Perdas de Água em Sistemas Públicos de Adução e Distribuição*. Portugal, 2005

ITONAGA, L.C.H.; *Estudo da Aplicação de Modelos de Redes de Água no Controle de Perdas em Casos Reais*. 2005. 219 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília - UnB. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil.

ITU – International Telecommunication Union. *Vocabulary of terms for broadband aspects of ISDN*. Suíça, 1997.

IWA – International Water Association. *District Metered Areas - Guidance Notes*. EUA, 2007

JAIN, A.; ORMSBEE, L.E. (2002). *Short-term water demand forecast modeling techniques - conventional methods versus AI*. Journal AWWA - American Water Works Association 94. pp.64-72.

KANG, D.; LANSEY, K. (2009). *Real-time demand estimation and confidence limit analysis for water distribution systems*. Journal of Hydraulics Engineering 135 (10). pp. 825-837.

KING, T.; GAGE, K. (2017). *Insurance 2.0 is a Game Changer*. Property Casualty 360, disponível em: <https://propertycasualty360/2017/04/27/insurance-2-0-is-a-game-changer>. Acesso em: 30/01/20201.

KOECH, R.; GYASI-AGYEI, Y.; RANDALL, T. (2018). *The evolution of urban water metering and conservation in Australia*. Flow Measurement and Instrumentation 62. pp. 19-26.

KONTOKOSTA, C.E.; JAIN, R.K. (2015) *Modeling the determinants of large-scale buildings water use: implications for data-driven urban sustainability policy*. Sustainable Cities Society 18, pp. 44-55.

KOPPEL, T.; VASSILJEV, A. (2013) *Estimation of real-time water fluxes in the water distribution system on the basis of pressure measurements*. Advances in Engineering Software 66. pp. 19-23.

KUMAR, S. M.; NARASIMHAN, S.; BHALLAMUDI, S. M. (2008). *State estimation in water distribution networks using graph-theoretic reduction strategy*. Journal of Water Resources Planning and Management 134 (5). pp. 395-403.

LAMBERT, A. (1993) *Controlling leaks with BABE*. Water and Waste Treatment, 41, 51-52.

LIMA, J.E.F.W.; FREITAS, G. K.; PINTO, M.A.T.; SALLES, P.S.B.A. (2018). *Gestão da Crise Hídrica 2016-2018 - Experiências do Distrito Federal*. ADASA, Caesb, Emater-DF, Seagri-DF, 331 p.

LIMA, C.A.F.; NAVAS, J.R.P. (2012) *Smart metering and systems to support a conscious use of water and electricity*. Energy 45. pp. 528-540.

*Lora Alliance 2020 Annual Report*. Lora Alliance, disponível em <https://lora-alliance.org/about-lora-aliance> . Acesso em: 30/01/20201

MAZZOLANI, G.; BERNARDI, L.; LAUCELLI, D.; MARTINO, R.; SIMONE, A.; GIUSTOLISI, O. (2016) *A methodology to estimate leakages in water distribution networks based on inlet flow data analysis*. Procedia Engineering 162. pp. 411-418.

MONKS, I.; STEWART, R.A.; SAHIN, O.; KELLER, R. (2019). *Revealing Unreported Benefits of Digital Water Metering: Literature Review and Expert Opinions*. Water, 11, 838-870.

MONKS, I.; STEWART, R.A.; SAHIN, O.; KELLER, R; CHOY, S.L. (2020). *Expert Opinion Valuation Method to Quantify Digital Water Metering Benefits*. Water, 12, 1436-1457.

OSHIMA, N.; KOSUDA, T. (1998) *Distribution reservoir control with demand prediction using deterministic-chaos method*. Water Science and Technology 37. pp. 389-395.

R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria, ISBN: 3-900051-07-0.

SÁNCHEZ, A.S.; OLIVEIRA-ESQUERRE, K.P.; NOGUEIRA, I.B.R.; JONG, P.; FILHO, A.A. *Water Loss Management Through Smart Water Systems*. In. PATNAIK, S.; SEN, S.; MAHMOUD, M.S. *Smart Village Technology*. Suíça: Springer Nature, 2020. pp. 233-266

SANTOS, R. L. *Redes GSM, GPRS, EDGE e UMTS*. Grupo de Informática e Automação GTA/UFRJ, disponível em [https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos\\_vf\\_2008\\_2](https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2). Acesso em: 30/01/20201

SEGUIDO, A.F.M. (2017) *Factores que inciden en el consumo de agua doméstico. Estudio a partir de un análisis bibliométrico*. Estudios Geográficos 282, pp. 257-281.

SILVA, N.R.; *Estudo de Metodologias para Avaliação de Submedição de Hidrômetros Domiciliares em Sistemas de Água*. 2008. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília - UnB. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil.

SNIS (2018) *Glossário de Indicadores – Água e Esgoto*. Sistema Nacional de Indicadores sobre Saneamento – SNIS. Brasília-DF.

The New Zealand Water & Wastes Association. *Water Loss Guidelines*. New Zealand, 2010

TORRENT, S, G.; PÉREZ, R. (2020) *Modelling daily water consumption through potential curves. Disaggregating apparent and real losses*. Urban Water Journal 17, pp. 292-302.

TSUTIYA, M. T.(2006). *Abastecimento de Água*. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 659 p.

USP (2017) *Eletrônica de Controle Industrial – Medidores de Vazão*. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos. São Paulo-SP.

VAN THIENEN, P. (2013). *A method for quantitative discrimination in flow pattern evolution of water distribution supply areas with interpretation in terms of demand and leakage*. Journal of Hydroinformatics, 15.1, 86-102.

VAN THIENEN, P.; PIETERSE-QUIRIJINS, I.; VREEBURG, J.; VANGEEL, K.; KAPELAN, Z. (2013). *Applications of discriminative flow pattern analysis using the CFPD method*. Water Science & Technology: Water Supply, 13.4, 906-913.

*“Zigbee Smart Energy Profile Specification Documents”*. Zigbee Alliance, disponível em <https://zigbeealliance.or/solution/zigbee>. Acesso em: 30/01/20201

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A – DETALHAMENTO DOS CUSTOS PROPORCIONAIS DOS BENEFÍCIOS

### 1 – Detalhamento 5.1.1:

<b>Benefício</b>	<b>Custos Considerados</b>	<b>Total Apurado</b>	<b>Total/Ligação</b>	<b>% do Custo Operacional</b>
A	Leiturista/Faturamento	R\$ 3.149.019,00	R\$4,50	0,24%
B	Faturamentos Estimados	R\$1.440.080,72	R\$2,06	0,11%
C	Saúde e Segurança Ocupacional	R\$654.582,15	R\$0,94	0,05%
D	-	-	-	0,00%
E	Erros/Perdas de dados de Consumo Residencial sem receita	R\$4.712.991,45	R\$6,73	0,36%
F	-	-	-	0,00%

### 1 – Detalhamento 5.1.2:

<b>Benefício</b>	<b>Custos Considerados</b>	<b>Total Apurado</b>	<b>Total/Ligação</b>	<b>% do Custo Operacional</b>
A	Leiturista/Faturamento	R\$ 3.149.019,00	R\$4,50	0,24%
B	Faturamentos Estimados	R\$1.440.080,72	R\$2,06	0,11%
C	Saúde e Segurança Ocupacional	R\$654.582,15	R\$0,94	0,05%
D	-	-	-	0,00%
E	Erros/Perdas de dados de Consumo Residencial sem receita	R\$4.712.991,45	R\$6,73	0,36%
F	Incidentes e custos de indenização/sinistros	R\$65.458,21	R\$0,09	0,01%
G	Vazamentos de rede (instalações do prestador de serviços)	R\$45.951.666,59	R\$65,67	3,51%
H	Vazamentos internos (em instalações do usuário)	R\$29.325.280,11	R\$41,91	2,24%
I	-	-	-	0,00%
J	-	-	-	0,00%

## APÊNDICE B – CÓDIGOS UTILIZADOS (RStudio)

### 1 – Simulação de Monte Carlo (itens 5.1.1 e 5.1.2):

```
#####SIMULAÇÃO ITEM 5.1.1#####  
#quantidade de iterações  
ite = 50000  
#array com todas as reduções  
red <- rep(0,ite)  
for (i in seq(1,ite)){  
  #Distribuição de frequencia benefícios  
  dist <- rnorm(104,mean = 0.690144, sd = 0.194225)  
  mult <- data.frame(dist)  
  #cálculo do benefício  
  red [i] = sample(mult$dist,1)*0.0076*1870.82*423  
}  
mean(red)  
median(red)  
sd(red)  
hist(red,  
  col="lightgreen",  
  main = "Economia Anual dos Benefícios - Cenário 01",  
  xlab = "Redução do Custo Operacional (R$)",  
  ylab = "Frequência",  
  breaks = 50,  
  xlim = range(red)  
)  
  
#####SIMULAÇÃO ITEM 5.1.2#####  
#quantidade de iterações  
ite = 50000  
#array com todas as reduções  
red <- rep(0,ite)
```

```

for (i in seq(1,ite)){
  #Distribuição de frequencia benefícios
  dist <- rnorm(152,mean = 0.682072, sd = 0.194085)
  mult <- data.frame(dist)
  #cálculo do benefício
  red [i] = sample(mult$dist,1)*0.06515*1870.82*423
}
mean(red)
median(red)
sd(red)
red2 <- red/1000
hist(red2,
  col="lightgreen",
  main = "Economia Anual dos Benefícios - Cenário 02",
  xlab = "Redução do Custo Operacional (R$ x mil)",
  ylab = "Frequência",
  breaks = 50,
  xlim = range(red2)
)

```

## 2 – Modelagem do Consumo de Água (itens 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3):

```

#####MODELAGEM 5.3.1#####
#IMPORTAÇÃO E REGULARIZAÇÃO DE DADOS
vazao <- scan()
TSvazao = ts(vazao)
ggtsdisplay(TSvazao)
BoxCox.lambda(TSvazao)
adf.test(TSvazao)
TSfinal <- tsclean(TSvazao)
#MODELAGEM E PLOT
model1 <- auto.arima(TSfinal, trace = T)
ARIMA<-model1$fitted
TSfinalteste <- window (TSfinal, start = 80%*Nº de dados “TSfinal” + 1)

```

```

TSfinaltreino <- window (TSfinal, start = 0, end = 80%*Nº de dados "TSfinal")
model1 <- auto.arima(TSfinaltreino, trace = T)
ARIMA<-model1$fitted
previsao<-forecast(model1, h=20%*Nº de dados "TSfinal", level=0)
autoplot(TSfinaltreino, xlab="Tempo (4h)", ylab="Vazão(1/h)", colour = "red")+
autolayer(previsao, colour = "green")+
ggtitle("ARIMA - UNIDADE")
#TESTES
summary(model1)
checkresiduals(model1)
shapiro.test(model1$residuals)
coeftest(model1)

#####MODELAGEM 5.3.2#####
#IMPORTAÇÃO E REGULARIZAÇÃO DE DADOS
vazao <- scan()
TSvazao = ts(vazao, frequency = 6)
ggtsdisplay(TSvazao)
BoxCox.lambda(TSvazao)
adf.test(TSvazao)
TSfinal <- tsclean(TSvazao)
#MODELAGEM E PLOT
TSfinalteste <- window (TSfinal, start = 80%*Nº de dados "TSfinal" + 1)
TSfinaltreino <- window (TSfinal, start = 0, end = 80%*Nº de dados "TSfinal")
model2 <- auto.arima(TSfinaltreino, trace = T, stepwise = FALSE, approximation = FALSE)
SARIMA<-model2$fitted
autoplot(TSfinalteste, xlab="Tempo (dia)", ylab="Vazão(1/h)", colour = "red")+
autolayer(previsao, colour = "green")+
ggtitle("SARIMA - UNIDADE")
previsao<-forecast(model2, h=20%*Nº de dados "TSfinal", level=0)
#TESTES
summary(model2)
checkresiduals(model2)

```

```
shapiro.test(model2$residuals)
```

```
coefest(model2)
```

```
#####MODELAGEM 5.3.3#####
```

```
#IMPORTAÇÃO E REGULARIZAÇÃO DE DADOS
```

```
dados <- read_excel("ARQUIVO EXCEL DE DADOS")
```

```
m<-cor(dados)
```

```
corrplot(m)
```

```
corrplot(m, method="number", type="upper", tl.cex=0.6, number.cex=0.5)
```

```
#MODELAGEM E PLOTAGEM
```

```
mod <- lm(Vazao ~ Media + Vazaot1 + Vazaot6 + Vazaot12 + Vazaot18 + Vazaot24
```

```
+Vazaot30 + Vazaot36 + Vazaot42 + Int2a5 + Int6a9 + Int10a13
```

```
+ Int14a17 + Int18a21 + Int22a1, dados)
```

```
par(mfrow=c(2,2))
```

```
plot(mod)
```

```
summary(mod)
```

```
summary(rstandard(mod))
```

```
lm.beta(mod)
```

```
confint(mod, level = 0.95)
```

```
dadosf<- dados[,-c("colunas desnecessárias")]
```

```
pairs.panels(dadosf)
```

```
mod2 <- lm(Vazao ~ "colunas explicativas", dados)
```

```
par(mfrow=c(2,2))
```

```
plot(mod2)
```

```
#TESTES
```

```
summary(mod2)
```

```
summary(rstandard(mod2))
```

```
lm.beta(mod2)
```

```
confint(mod2, level = 0.95)
```

```
AIC(mod,mod2)
```

```
anova(mod,mod2)
```

## APÊNDICE C – BASES DE DADOS

### 1 – Extrato da Base de Dados da Medição de Vazão (itens 5.2.1):

Nº Aquisição	Horário	Data	Vazao [l/s]	Volume [l]
1	09:41:54	27/11/2020	2.367	333.24
2	09:43:54	27/11/2020	3.187	397.86
3	09:45:54	27/11/2020	3.444	360
4	09:47:54	27/11/2020	2.556	389.4
5	09:49:54	27/11/2020	3.934	373.92
6	09:51:54	27/11/2020	2.298	342
7	09:53:54	27/11/2020	3.402	385.92
8	09:55:54	27/11/2020	3.03	355.14
9	09:57:54	27/11/2020	2.889	362.04
10	09:59:54	27/11/2020	3.145	413.34
11	10:01:54	27/11/2020	3.744	410.4
12	10:03:54	27/11/2020	3.096	349.5
13	10:05:54	27/11/2020	2.729	288.12
14	10:07:54	27/11/2020	2.073	298.92
15	10:09:54	27/11/2020	2.909	369.78
16	10:11:54	27/11/2020	3.254	360.48
17	10:13:54	27/11/2020	2.754	336.36
18	10:15:54	27/11/2020	2.852	306.9
19	10:17:54	27/11/2020	2.263	270.36
20	10:19:54	27/11/2020	2.243	282.06
21	10:21:54	27/11/2020	2.458	295.86
22	10:23:54	27/11/2020	2.473	308.58
23	10:25:54	27/11/2020	2.67	323.76
24	10:27:54	27/11/2020	2.726	317.1
25	10:29:54	27/11/2020	2.559	327.9
26	10:31:54	27/11/2020	2.906	348.42
27	10:33:54	27/11/2020	2.901	331.86
28	10:35:54	27/11/2020	2.63	323.76
29	10:37:54	27/11/2020	2.766	316.26
30	10:39:54	27/11/2020	2.505	306.96
31	10:41:54	27/11/2020	2.611	311.22
32	10:43:54	27/11/2020	2.576	336.18
33	10:45:54	27/11/2020	3.027	354.06
34	10:47:54	27/11/2020	2.874	328.92
35	10:49:54	27/11/2020	2.608	308.82
36	10:51:54	27/11/2020	2.539	320.34
37	10:53:54	27/11/2020	2.8	338.1
38	10:55:54	27/11/2020	2.835	277.2
39	10:57:54	27/11/2020	1.785	281.76
40	10:59:54	27/11/2020	2.911	302.76
41	11:01:54	27/11/2020	2.135	273.48
42	11:03:54	27/11/2020	2.423	347.4
43	11:05:54	27/11/2020	3.367	415.32
44	11:07:54	27/11/2020	3.555	343.74
45	11:09:54	27/11/2020	2.174	232.92

## 2 – Extrato da Base de Dados da Regressão Linear Multivariada – Apartamento 01

(item 5.3.3):

V	m	V1	V6	V12	V18	V24	V30	V36	V42	2-5	6-9	10- 13	14-17	18-21	22- 1
3	12.82	18	2.75	6.5	4	8	18.25	0	0	0	1	0	0	0	0
30	120.07	3	15.25	18.25	11.25	24.25	3.25	0	0	0	0	1	0	0	0
40.25	161.50	30	40	39.75	27.25	41.5	40	33.5	0	0	0	0	1	0	0
15	60.40	40.25	31	12	24	29.75	32.25	25.75	0	0	0	0	0	1	0
21.5	86.55	15	17.75	19.5	19.75	19.5	19.75	0	0	0	0	0	0	0	1
24.25	97.50	21.5	18	12	7.75	7.25	10.5	28	0	1	0	0	0	0	0
2.5	22.67	24.25	3	2.75	6.5	4	8	18.25	0	0	1	0	0	0	0
33.75	72.48	2.5	30	15.25	18.25	11.25	24.25	3.25	0	0	0	1	0	0	0
5.5	140.94	33.75	40.25	40	39.75	27.25	41.5	40	33.5	0	0	0	1	0	0
71.5	101.88	5.5	15	31	12	24	29.75	32.25	25.75	0	0	0	0	1	0
27.5	96.53	71.5	21.5	17.75	19.5	19.75	19.5	19.75	0	0	0	0	0	0	1
3.75	84.06	27.5	24.25	18	12	7.75	7.25	10.5	28	1	0	0	0	0	0
18	23.22	3.75	2.5	3	2.75	6.5	4	8	18.25	0	1	0	0	0	0
14	90.19	18	33.75	30	15.25	18.25	11.25	24.25	3.25	0	0	1	0	0	0
52.75	142.19	14	5.5	40.25	40	39.75	27.25	41.5	40	0	0	0	1	0	0
43.25	88.94	52.75	71.5	15	31	12	24	29.75	32.25	0	0	0	0	1	0
8.5	60.71	43.25	27.5	21.5	17.75	19.5	19.75	19.5	19.75	0	0	0	0	0	1
5.25	33.64	8.5	3.75	24.25	18	12	7.75	7.25	10.5	1	0	0	0	0	0
3	17.25	5.25	18	2.5	3	2.75	6.5	4	8	0	1	0	0	0	0
7.75	124.31	3	14	33.75	30	15.25	18.25	11.25	24.25	0	0	1	0	0	0
82.5	162.40	7.75	52.75	5.5	40.25	40	39.75	27.25	41.5	0	0	0	1	0	0
31.75	127.58	82.5	43.25	71.5	15	31	12	24	29.75	0	0	0	0	1	0
22.5	90.80	31.75	8.5	27.5	21.5	17.75	19.5	19.75	19.5	0	0	0	0	0	1
10.25	41.83	22.5	5.25	3.75	24.25	18	12	7.75	7.25	1	0	0	0	0	0
8.25	33.75	10.25	3	18	2.5	3	2.75	6.5	4	0	1	0	0	0	0
20	82.89	8.25	7.75	14	33.75	30	15.25	18.25	11.25	0	0	1	0	0	0
31.25	125.00	20	82.5	52.75	5.5	40.25	40	39.75	27.25	0	0	0	1	0	0
43.5	143.50	31.25	31.75	43.25	71.5	15	31	12	24	0	0	0	0	1	0
13	78.47	43.5	22.5	8.5	27.5	21.5	17.75	19.5	19.75	0	0	0	0	0	1
36.25	43.13	13	10.25	5.25	3.75	24.25	18	12	7.75	1	0	0	0	0	0
0	9.50	36.25	8.25	3	18	2.5	3	2.75	6.5	0	1	0	0	0	0
22	137.50	0	20	7.75	14	33.75	30	15.25	18.25	0	0	1	0	0	0
14.25	121.73	22	31.25	82.5	52.75	5.5	40.25	40	39.75	0	0	0	1	0	0
40.5	97.78	14.25	43.5	31.75	43.25	71.5	15	31	12	0	0	0	0	1	0
18.75	94.67	40.5	13	22.5	8.5	27.5	21.5	17.75	19.5	0	0	0	0	0	1
3.75	27.67	18.75	36.25	10.25	5.25	3.75	24.25	18	12	1	0	0	0	0	0
11.5	32.13	3.75	0	8.25	3	18	2.5	3	2.75	0	1	0	0	0	0
9.5	198.00	11.5	22	20	7.75	14	33.75	30	15.25	0	0	1	0	0	0
5.5	181.43	9.5	14.25	31.25	82.5	52.75	5.5	40.25	40	0	0	0	1	0	0
91.25	58.36	5.5	40.5	43.5	31.75	43.25	71.5	15	31	0	0	0	0	1	0
21	84.33	91.25	18.75	13	22.5	8.5	27.5	21.5	17.75	0	0	0	0	0	1
8	32.00	21	3.75	36.25	10.25	5.25	3.75	24.25	18	1	0	0	0	0	0

### 3 – Extrato das Bases de Dados do Sistema de Alarme de vazamentos (item 5.5):

#### Base 1:

Unidade	Data	Vazao (l/h)	Média Móvel	Varição
Apartamento 1	08/01/2020	3	16.29878049	2.77%
Apartamento 1	08/01/2020	30	16.37195122	0.45%
Apartamento 1	08/01/2020	40.25	17.10365854	4.47%
Apartamento 1	08/01/2020	15	18.08536585	5.74%
Apartamento 1	08/01/2020	21.5	18.45121951	2.02%
Apartamento 1	09/01/2020	24.25	18.97560976	2.84%
Apartamento 1	09/01/2020	2.5	19.56707317	3.12%
Apartamento 1	09/01/2020	33.75	19.62804878	0.31%
Apartamento 1	09/01/2020	5.5	19.63414634	0.03%
Apartamento 1	09/01/2020	71.5	19.1402439	-2.52%
Apartamento 1	09/01/2020	27.5	20.88414634	9.11%
Apartamento 1	10/01/2020	3.75	20.87195122	-0.06%
Apartamento 1	10/01/2020	18	20.51829268	-1.69%
Apartamento 1	10/01/2020	14	20.87804878	1.75%
Apartamento 1	10/01/2020	52.75	20.24390244	-3.04%
Apartamento 1	10/01/2020	43.25	20.74390244	2.47%
Apartamento 1	10/01/2020	8.5	21.31707317	2.76%
Apartamento 1	11/01/2020	5.25	21.26829268	-0.23%
Apartamento 1	11/01/2020	3	21.20121951	-0.32%
Apartamento 1	11/01/2020	7.75	20.68292683	-2.44%
Apartamento 1	11/01/2020	82.5	19.8597561	-3.98%
Apartamento 1	11/01/2020	31.75	21.14634146	6.48%
Apartamento 1	11/01/2020	22.5	21.44512195	1.41%
Apartamento 1	12/01/2020	10.25	21.81707317	1.73%
Apartamento 1	12/01/2020	8.25	21.9695122	0.70%
Apartamento 1	12/01/2020	20	21.89634146	-0.33%
Apartamento 1	12/01/2020	31.25	21.7195122	-0.81%
Apartamento 1	12/01/2020	43.5	21.89634146	0.81%
Apartamento 1	12/01/2020	13	22.47560976	2.65%
Apartamento 1	13/01/2020	36.25	22.60365854	0.57%
Apartamento 1	13/01/2020	0	23.32926829	3.21%
Apartamento 1	13/01/2020	22	22.88414634	-1.91%
Apartamento 1	13/01/2020	14.25	22.45121951	-1.89%
Apartamento 1	13/01/2020	40.5	22.50609756	0.24%
Apartamento 1	14/01/2020	18.75	23.01829268	2.28%
Apartamento 1	14/01/2020	3.75	23.18292683	0.72%
Apartamento 1	14/01/2020	11.5	23.20731707	0.11%
Apartamento 1	14/01/2020	9.5	23.11585366	-0.39%
Apartamento 1	14/01/2020	5.5	22.37195122	-3.22%
Apartamento 1	14/01/2020	91.25	21.75	-2.78%
Apartamento 1	15/01/2020	21	23.54268293	8.24%

**Base 2:**

Unidade	Vazao	Semana	a	%b ( $\sigma$ )	b	Média Móvel	Indicador
Apartamento 1	0	3	1.50948	-3.14%	-0.77286	46.09%	0
Apartamento 1	0	4	1.011629	-5.33%	-1.31198	-4.48%	0
Apartamento 1	0	5	0.934593	7.95%	1.958149	2.28%	0
Apartamento 1	0	6	1.403031	-29.26%	-7.20574	8.57%	0
Apartamento 1	0	7	0.707157	19.57%	4.821162	-9.73%	0
Apartamento 1	0	8	1.259232	-9.00%	-2.21588	15.97%	0
Apartamento 1	0	9	0.593613	26.08%	6.423173	-15.75%	0
Apartamento 1	0	10	1.06678	-5.15%	-1.26754	0.85%	0
Apartamento 1	0	11	1.182001	-12.53%	-3.08626	4.13%	0
Apartamento 1	0	12	1.05583	10.12%	2.493076	16.50%	0
Apartamento 1	0	13	0.938442	17.91%	4.411328	10.43%	0
Apartamento 1	0.75	14	1.034788	-31.10%	-7.65881	-22.59%	0
Apartamento 1	0	15	0.900278	32.96%	8.118672	25.73%	0
Apartamento 1	0	16	0.982816	-24.64%	-6.06826	-22.94%	0
Apartamento 1	0	17	0.745378	34.79%	8.56759	13.43%	0
Apartamento 1	0	18	0.826817	5.87%	1.446559	-11.53%	0
Apartamento 1	0	19	1.147164	-6.37%	-1.56885	7.62%	0
Apartamento 1	0	20	1.210552	-11.49%	-2.83081	9.16%	0
Apartamento 1	2.75	21	0.712374	29.65%	7.303044	-0.64%	0
Apartamento 1	2.75	22	0.39705	41.01%	10.09992	-21.15%	0
Apartamento 1	1.75	23	1	0.00%	0	0.00%	0
Apartamento 1	0	24	1.457728	-29.62%	-7.29472	9.92%	0
Apartamento 1	0.5	25	1.410095	-28.27%	-6.96267	9.87%	0
Apartamento 1	0	26	1.040352	7.16%	1.764447	11.22%	0
Apartamento 1	1	27	1.01373	-4.25%	-1.04783	-2.46%	0
Apartamento 1	1.75	28	0.969061	2.45%	0.604438	-0.83%	0
Apartamento 1	0	29	0.962328	11.22%	2.763706	6.69%	0
Apartamento 1	0.75	30	0.909591	-2.41%	-0.59311	-11.14%	0
Apartamento 1	0	31	0.992808	-1.95%	-0.48048	-2.64%	0
Apartamento 1	1.5	32	1.239324	-26.97%	-6.64279	-3.29%	0
Apartamento 1	0	33	0.711184	35.38%	8.71349	8.05%	0
Apartamento 1	0.75	34	0.925976	-10.90%	-2.68426	-17.93%	0
Apartamento 1	2.25	35	0.858557	19.58%	4.822454	8.90%	0
Apartamento 1	0	36	1.014976	4.20%	1.033769	6.03%	0
Apartamento 1	0	37	0.682128	26.13%	6.435967	-5.15%	0
Apartamento 1	0	38	1.653932	-33.00%	-8.1288	29.92%	0
Apartamento 1	0	39	1.258669	-42.39%	-10.4396	-9.20%	0
Apartamento 1	0.25	40	0.629761	52.26%	12.87278	10.59%	0
Apartamento 1	0	41	0.791044	14.83%	3.652294	-8.68%	0
Apartamento 1	0	42	1.3678	-52.81%	-13.0066	-10.86%	0