UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

RAFAEL GASPAR DAMIANO

Modelagem estocástica da demanda individualizada de água residencial

VERSÃO CORRIGIDA

SÃO CARLOS

2018

RAFAEL GASPAR DAMIANO

Modelagem estocástica da demanda individualizada de água residencial

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientadora: Professora Titular Luisa Fernanda Ribeiro Reis

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

D136m Damiano, Rafael Gaspar
Modelagem estocástica da demanda individualizada de água residencial / Rafael Gaspar Damiano; orientadora Luisa Fernanda Ribeiro Reis. São Carlos, 2018.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. demanda de água residencial. 2. processos estocásticos. 3. modelo dos pulsos retangulares de Neyman Scott (NSRP). 4. modelo dos Pulsos Totais (OP).
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RAFAEL GASPAR DAMIANO**.

Título da dissertação: "Modelagem estocástica da demanda individualizada de água residencial".

Data da defesa: 01/10/2018

Comissão Julgadora:

Profª. Titular **Luisa Fernanda Ribeiro Reis**
(Orientadora)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Erich Kellner**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Dr. **Daniel Jadyr Leite Costa**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Resultado:

Aprovado

APROVADO

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Dr. **Eduardo Mario Menciondo**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo, por fornecer os meios para a busca contínua do aprendizado.

À professora Luisa Fernanda Ribeiro Reis, pelos ensinamentos, apoio, conselhos e disponibilidade.

Aos amigos conquistados no PPG-SHS, principalmente ao Arlan e Tatiana, por dividir os momentos felizes e de dificuldades.

Ao SAAE São Carlos, por disponibilizar o acesso às leituras de consumo de água, possibilitando a elaboração deste trabalho de pesquisa.

Aos amigos da HIDROSAN, pelo incentivo e companheirismo.

À minha família, pelo apoio incondicional.

RESUMO

DAMIANO, R. G. **Modelagem estocástica da demanda individualizada de água residencial**. 2018. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A modelagem da demanda de água residencial fornece importantes subsídios ao dimensionamento e gerenciamento de redes de abastecimento de água. O comportamento desta demanda pode ser descrito através de processos estocásticos, caracterizados pela ocorrência de pulsos retangulares de demanda de água ao longo do tempo. Nesse contexto, este trabalho de pesquisa teve como objetivos monitorar e modelar a demanda de água residencial através dos modelos estocásticos dos pulsos retangulares de Neyman Scott (NSRP) e dos Pulsos Totais (OP). Enquanto que no modelo NSRP há a tentativa de simular a demanda de água através da representação dos seus constituintes elementares, no modelo OP busca-se a representação direta da demanda de água agregada dos usuários finais, como observada nos hidrômetros. A calibração e a validação dos modelos foram feitas a partir do monitoramento do consumo de água de quatro residências localizadas na cidade de São Carlos, caracterizadas por perfis de abastecimento distintos. Para tanto, foram desenvolvidos dispositivos *dataloggers*, que associados aos sensores/emissores de pulsos dos hidrômetros, permitiram o monitoramento do consumo de água ao longo do tempo dos usuários residenciais individuais. Durante a elaboração da pesquisa, foram observados efeitos negativos nas modelagens relacionados à influência dos reservatórios domiciliares (caixas d'água) no perfil temporal do consumo de água das residências. Buscando mitigar esses efeitos, foram propostas modificações nas etapas de calibração e de geração das séries sintéticas de demanda de água. De uma forma geral, observou-se que as modificações propostas contribuíram para que as séries sintéticas geradas a partir dos modelos NSRP e OP reproduzissem de forma mais acurada as estatísticas das séries observadas, principalmente com relação às intensidades e durações das demandas simuladas. Apesar de as versões modificadas dos modelos NSRP e OP apresentarem desempenho similar na reprodução das médias, variâncias e covariâncias das séries observadas, o modelo OP reproduziu de forma mais consistente os volumes consumidos diários observados.

Palavras-chaves: demanda de água residencial, processos estocásticos, modelo dos Pulsos Retangulares de Neyman Scott (NSRP), modelo dos Pulsos Totais (OP).

ABSTRACT

DAMIANO, R. G. **Stochastic modelling of individualized residential water demand**. 2018. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

The modelling of residential water demand provides important subsidies for the design and management of water supply networks. The behavior of this demand can be described through stochastic processes, characterized by the occurrence of rectangular pulses of water demand over time. In this context, the objectives of this research were to monitor and model residential water demand using the Neyman Scott Rectangular Pulse model (NSRP) and Overall Pulse model (OP). While in the NSRP model there is the attempt to simulate the water demand through the representation of its elementary constituents, the OP model aims to direct represent the aggregate water demand of the end users, as observed in water meters. The calibration and validation of the models were done by monitoring the water consumption of four residences located in the city of São Carlos, characterized by different supply profiles. To this end, dataloggers were developed, which, coupled with sensors/pulse emitters and water meters, allowed the monitoring of water consumption over time of individual residential users. During the research, negative effects were observed in the models, related to the influence of the domestic reservoirs on the temporal pattern of water consumption of the residences. To mitigate these effects, modifications were proposed in the calibration and generation stages of the synthetic water demand generation series. In general, it was observed that these proposed modifications contributed to a more accurately reproduction of the observed series statistics by the OP and NSRP synthetic series, especially regarding the intensities and durations of the simulated demands. Although the modified versions of the NSRP and OP models presented similar performance in the reproduction of the means, variances and covariance of the observed series, the OP model reproduced in a more consistent way the observed daily consumed volumes.

Keywords: residential water demand; stochastic processes; Neyman Scott Rectangular Pulse model (NSRP); Overall Pulse model (OP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Representação do modelo Neyman Scott aplicado à demanda residencial. Fonte: adaptado de Cowpertwait <i>et al.</i> , 1995.....	7
Figura 3.2 – Representação dos passos que constituem o modelo dos Pulsos Totais. Fonte: adaptado de Gargano <i>et al.</i> , 2015.	9
Figura 3.3 – Esquema de funcionamento do hidrômetro do tipo velocimétrico. Fonte: Tsutiya, 2004.....	12
Figura 3.4 – Esquema de funcionamento do hidrômetro do tipo volumétrico de êmbolo rotativo. Fonte: adaptado de Tsutiya, 2004.	13
Figura 3.5 – Exemplo de curva de erros de medição em hidrômetros. Fonte: Da Silva (2008)	14
Figura 4.1 - Esquema com a localização do Condomínio Parque Fehr (“Monitoramento A”) no município de São Carlos	18
Figura 4.2 – Esquema do processo de aquisição de dados realizado no condomínio Parque Fehr	20
Figura 4.3 - Esquema com a localização da Residência 4 (“Monitoramento B”) no município de São Carlos	21
Figura 4.4 – Hidrômetro (esq.) sensor/emissor de pulsos (dir.)	23
Figura 4.5 – Esquemático do <i>datalogger</i>	24
Figura 4.6 – <i>Layout</i> da PCB confeccionada	25
Figura 4.7 – Caixa hermética de abrigo da PCB e baterias	25
Figura 4.8 – Instalação nos cavaletes dos hidrômetros da Residência 1 (esq.) e 2 (dir.).....	26
Figura 4.9 - Instalação nos cavaletes dos hidrômetros da Residência 3 (esq.) e 4 (dir.)	26
Figura 4.10 – Esquema de funcionamento do algoritmo do <i>datalogger</i>	27
Figura 4.11 – Exemplo de série de consumo de água da Residência 3, com destaque para os valores de vazão predominantes	32
Figura 4.12 – Etapas de subtração e adição de demandas no contexto total do processo de modelagem	33

Figura 4.13 – Exemplo ilustrativo dos procedimentos que compõem o Método de Adição das Demandas – Parte 1.....	37
Figura 4.14 - Exemplo ilustrativo dos procedimentos que compõem o Método de Adição das Demandas – Parte 2.....	38
Figura 4.15 – Fluxograma do método <i>Shuffled Complex Evolution</i> . Fonte: adaptado de Duan, Gupta e Sorooshian, 1993.	41
Figura 5.1 – Série de consumo de água da Residência 3 antes (esq.) e após (dir.) o processo de subtração de demanda (dia 17/04/2017).....	44
Figura 5.2 – Exemplos de anomalias identificadas nas séries de consumo de água da Residência 4 durante os dias 16/06/2017 e 11/07/2017.....	45
Figura 5.3 - Valores de α_i obtidos para as residências 1 a 4 considerando-se as séries de dados originais.....	49
Figura 5.4 - Valores de α_i obtidos para as residências 1 a 4 considerando-se as séries de dados modificadas.....	49
Figura 5.5 – Gráficos Q-Q Normal da variável <i>Nad</i> observada nas séries original e modificada da Residência 1	50
Figura 5.6 - Gráficos Q-Q Normal da variável <i>Nad</i> observada nas séries original e modificada da Residência 2	50
Figura 5.7 - Gráficos Q-Q Normal da variável <i>Nad</i> observada nas séries original e modificada da Residência 3	51
Figura 5.8 - Gráficos Q-Q Normal da variável <i>Nad</i> observada nas séries original e modificada da Residência 4	51
Figura 5.9 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável τ observada nas séries original e modificada da Residência 1	52
Figura 5.10 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável τ observada nas séries original e modificada da Residência 2	53
Figura 5.11 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável τ observada nas séries original e modificada da Residência 3	53
Figura 5.12 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável τ observada nas séries original e modificada da Residência 4	53

Figura 5.13 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável q observada nas séries original e modificada da Residência 1.....	54
Figura 5.14 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável q observada nas séries original e modificada da Residência 2.....	55
Figura 5.15 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável q observada nas séries original e modificada da Residência 3.....	55
Figura 5.16 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável q observada nas séries original e modificada da Residência 4.....	55
Figura 5.17 - Gráficos das médias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado para as Residências 1 e 2	67
Figura 5.18 - Gráficos das médias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado para as Residências 3 e 4	68
Figura 5.19 - Gráficos das variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado para as Residências 1 e 2.....	68
Figura 5.20 - Gráficos das variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado para as Residências 3 e 4.....	68
Figura 5.21 - Gráficos das covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado para as Residências 1 e 2.....	69
Figura 5.22 - Gráficos das covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado para as Residências 3 e 4.....	69
Figura 5.23 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de intensidade das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos OP e OP modificado para as Residências 1 e 2	71
Figura 5.24 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de intensidade das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos OP e OP modificado para as Residências 3 e 4	72
Figura 5.25 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de duração das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos OP e OP modificado para as Residências 1 e 2	73

Figura 5.26 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de duração das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos OP e OP modificado para as Residências 3 e 4	74
Figura 5.27 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de volume consumido diário das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos OP e OP modificado para as Residências 1 e 2.....	75
Figura 5.28 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de volume consumido diário das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos OP e OP modificado para as Residências 3 e 4.....	76
Figura 5.29 – Gráficos das médias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado para as Residências 1 e 2	79
Figura 5.30 - Gráficos das médias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado para as Residências 3 e 4	80
Figura 5.31 - Gráficos das variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado para as Residências 1 e 2.....	80
Figura 5.32 - Gráficos das variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado para as Residências 3 e 4.....	80
Figura 5.33 - Gráficos das covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado para as Residências 1 e 2.....	81
Figura 5.34 - Gráficos das covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado para as Residências 3 e 4.....	81
Figura 5.35 – Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de intensidade das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP e NSRP modificado para as Residências 1 e 2.....	83
Figura 5.36 – Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de intensidade das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP e NSRP modificado para as Residências 3 e 4.....	83
Figura 5.37 – Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de duração das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP e NSRP modificado para as Residências 1 e 2.....	84

Figura 5.38 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de duração das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP e NSRP modificado para as Residências 3 e 4.....	85
Figura 5.39 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de volume consumido diário das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP e NSRP modificado para as Residências 1 e 2	86
Figura 5.40 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de volume consumido diário das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP e NSRP modificado para as Residências 3 e 4	87
Figura 5.41 - Gráficos das médias das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 1 e 2.....	88
Figura 5.42 - Gráficos das médias das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 3 e 4.....	88
Figura 5.43 - Gráficos das variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 1 e 2.....	88
Figura 5.44 - Gráficos das variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 3 e 4.....	89
Figura 5.45 - Gráficos das covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 1 e 2.....	89
Figura 5.46 - Gráficos das covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 3 e 4.....	89
Figura 5.47 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de intensidade das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 1 e 2	90
Figura 5.48 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de intensidade das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 3 e 4	91
Figura 5.49 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de duração das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 1 e 2	91

Figura 5.50 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de duração das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 3 e 4 91

Figura 5.51 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de volume consumido diário das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 1 e 2 92

Figura 5.52 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de volume consumido diário das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 3 e 4 92

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Analogias entre as variáveis do modelo dos pulsos retangulares de Neyman Scott aplicado à modelagem da chuva e de demanda de água. Fonte: adaptado de Yamanaka <i>et al.</i> , 2012.....	7
Tabela 3.2 – Principais variáveis que descrevem o modelo dos Pulsos Totais (OP)	8
Tabela 3.3 – Exemplos do uso de distribuições de probabilidade das variáveis intensidade e duração do pulso de demanda de água.....	10
Tabela 3.4 - Classes metrológicas e correspondentes valores de $Q_{\min}$ e Q_t . Fonte: INMETRO, 2000.....	14
Tabela 4.1 – Perfil, e localização das residências analisadas	17
Tabela 4.2 – Quantidade de ligações por categoria no Parque Fehr.....	18
Tabela 4.3 – Quantidade de ligações por faixa de consumo no Parque Fehr (mês de fevereiro de 2018). Fonte: SAAE (2018).....	19
Tabela 4.4 – Período de abrangência do Monitoramento A.....	20
Tabela 4.5 -Principais características de funcionamento dos hidrômetros utilizados	22
Tabela 4.6 - Principais características dos sensores/emissores de pulso	23
Tabela 4.7 – Exemplo de fragmento de série de demanda antes e após ser submetida ao método de subtração de demandas	34
Tabela 4.8 – Variáveis do Método de adição das demandas – Parte 1	35
Tabela 4.9 – Lista das funções desenvolvidas em Matlab para a Atividade 1	42
Tabela 4.10 - Lista das funções desenvolvidas em Matlab para a Atividade 2.....	43
Tabela 4.11 - Lista das funções desenvolvidas em Matlab para a Atividade 3.....	43
Tabela 4.12 - Lista das funções desenvolvidas em Matlab para a Atividade 4.....	43
Tabela 5.1 – Média e desvio padrão da variável Nad das séries de demanda de água observadas nas residências 1 a 4 (Condições original e modificada)	46
Tabela 5.2 – Parâmetros μNah e α_i das séries de demanda de água observadas nas residências 1 a 4 (Condição original).....	47

Tabela 5.3 - Parâmetros μ_{Nah} e α_i das séries de demanda de água observadas nas residências 1 a 4 (Condição modificada)	48
Tabela 5.4 – Média e desvio padrão da variável τ das séries de demanda de água observadas nas residências 1 a 4 (Condição 1 e 2)	52
Tabela 5.5 - Média e desvio padrão da variável q e valor de $pr0$ das séries de demanda de água observadas nas residências 1 a 4 (Condição 1 e 2)	54
Tabela 5.6 – Intervalo de busca dos parâmetros λ , η , μc , μc e β utilizados na minimização da função objetivo	57
Tabela 5.7 – Parâmetros adotados para a aplicação do método de otimização SCE-UA	58
Tabela 5.8 – Resultados obtidos pela calibração do modelo NSRP para a Residência 1	59
Tabela 5.9 - Resultados obtidos pela calibração do modelo NSRP para a Residência 2	60
Tabela 5.10 - Resultados obtidos pela calibração do modelo NSRP para a Residência 3	61
Tabela 5.11 - Resultados obtidos pela calibração do modelo NSRP para a Residência 4	62
Tabela 5.12 - Médias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado	65
Tabela 5.13 – Variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado	66
Tabela 5.14 - Covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado	67
Tabela 5.15 - Valores máximos, mínimos e médios das intensidades das demandas das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos OP e OP modificado	71
Tabela 5.16 - Valores máximos, mínimos e médios das durações das demandas das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos OP e OP modificado	73
Tabela 5.17 - Valores máximos, mínimos e médios dos volumes consumidos diários das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos OP e OP modificado	75
Tabela 5.18 – Médias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado	77
Tabela 5.19 - Variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado	78

Tabela 5.20 - Covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado	79
Tabela 5.21 – Valores máximos, mínimos e médios das intensidades das demandas das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP e NSRP modificado	82
Tabela 5.22 - Valores máximos, mínimos e médios das durações das demandas das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP e NSRP modificado	84
Tabela 5.23 - Valores máximos, mínimos e médios dos volumes consumidos diários das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP e NSRP modificado	86

LISTA DE ABREVIATURAS

SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SIMDEUM	<i>Simulation of Water Demand and End-Use Model</i>
NSRP	<i>Neyman Scott Rectangular Pulse</i>
OP	<i>Overall Pulse</i>
PRP	<i>Poisson Rectangular Pulse</i>
BD	Bloco de demanda
DE	Demanda elementar
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
NBR	Norma Brasileira
SAAE	Serviço Autônomo de Água e Esgoto São Carlos
DN	Diâmetro nominal
PCB	<i>Printed circuit board</i>
IDE	<i>Integrated development environment</i>
SCE-UA	<i>Shuffled Complex Evolution - University of Arizona</i>
FDA	Função de distribuição acumulada
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

$Y(t)$	Volume acumulado de água (método NSRP)
$Xu(\tau)$	Intensidade do pulso de demanda (método NSRP)
$N(t)$	Número de pulsos em um evento de consumo de água (método NSRP)
μ_c	Média do número de pulsos em um evento de demanda de água (método NSRP)
λ	Número médio de BD por unidade de tempo (método NSRP)
μ_c	Número médio de DE por BD (método NSRP)
β	β^{-1} representa o tempo médio entre as origens das DE com relação às origens dos BD (método NSRP)
η	η^{-1} representa a duração média das DE (método NSRP)
μ_x	Intensidade média de cada DE (método NSRP)
C	Número de DE por BD (método NSRP)
X	Intensidade de cada DE (método NSRP)
h	duração do intervalo discreto do método NSRP (método NSRP)
P	Probabilidade de ocorrência de bloco de demanda (método OP)
λ	Taxa de ocorrência de bloco de demanda (método OP)
Δt	Duração do intervalo discreto do método OP (método OP)
N_{ah}	Quantidade total de blocos de demanda por intervalo (método OP)
D	Duração dos intervalos diários nos quais λ é constante (método OP)
μ_t	Duração média dos blocos de demanda (método OP)
N_{ad}	Quantidade de blocos de demanda gerados diariamente (método OP)
α_i	Coefficiente de geração dos blocos de demanda (método OP)
μ_{Nad}	Valor médio da quantidade diária de blocos de demanda (método OP)
σ_{Nad}	Desvio padrão da quantidade diária de blocos de demanda (método OP)
μ_{Nah}	Valor médio da quantidade de blocos de demanda do intervalo (método OP)
μ_{Nad}	Valor médio da quantidade diária de blocos de demanda (método OP)
τ	Duração do bloco de demanda (método OP)
μ_t	Duração média dos blocos de demanda (método OP)
q	Intensidade do bloco de demanda (método OP)
μ_q	Intensidade média de demanda (método OP)
NOB	Número diário de intervalos de tempo nos quais o consumo de água é maior ou igual a 1 - séries observadas de demanda (método de subtração e adição das demandas)

$NSINT$	Número diário de intervalos de tempo nos quais o consumo de água é maior ou igual a 1 - séries sintéticas de demanda (método de subtração e adição das demandas)
VOB	Volume diário de água consumido, após o processo de subtração das demandas – séries observadas de demanda (método de subtração e adição das demandas)
$VSINT$	Volume diário de água consumido - séries sintéticas de demanda (método de subtração e adição das demandas)
μ_{NOB}	Média da variável NOB (método de subtração e adição das demandas)
σ_{NOB}	Desvio padrão da variável NOB (método de subtração e adição das demandas)
r	Coefficiente de correlação de Pearson relativo a NOB e VOB (método de subtração e adição das demandas)
P	Probabilidade de ocorrência de demanda igual a 1 L no intervalo de tempo analisado (método de subtração e adição das demandas)
Z_k	Número de intervalos de tempo sem demanda no intervalo analisado (método de subtração e adição das demandas)
S	Matriz de correlação desejada (método de Iman e Conover)
X	Matriz que contém os valores das variáveis que se deseja correlacionar (método de Iman e Conover)
X^*	Matriz de postos de X (método de Iman e Conover)
T	Matriz de correlação da matriz X^* (método de Iman e Conover)
Z	Matriz triangular inferior resultante da decomposição de Cholesky da matriz T (método de Iman e Conover)
A	Matriz triangular inferior resultante da decomposição de Cholesky da matriz S (método de Iman e Conover)
X^{**}	Matriz reordenada pelo método Iman e Conover (método de Iman e Conover)
D	Vetor de armazenamento dos pontos da amostra (método SCE-UA)
A	Complexo formado por um conjunto de pontos da amostra inicial (método SCE-UA)
p	Variável que representa a probabilidade (peso) dos pontos utilizados para a seleção das soluções pais (método SCE-UA)
B	Vetor de armazenamento das soluções pais selecionadas (método SCE-UA)
g	Centroide calculado a partir das localizações das soluções pais selecionadas (método SCE-UA)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	Modelos estocásticos para a representação da demanda de água doméstica	5
3.1.1	Modelo dos pulsos retangulares de Neyman Scott	6
3.1.2	Modelo dos Pulsos Totais	8
3.1.3	Distribuições de probabilidade das variáveis intensidade e duração dos pulsos de demanda.....	9
3.2	Agregação espacial e temporal de séries sintéticas	10
3.3	Micromedição do consumo de água	11
3.4	Efeitos da utilização de reservatórios particulares na micromedição do consumo de água	15
4	MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1	Aquisição de dados	17
4.1.1	Monitoramento A – Parque Fehr	17
4.1.2	Monitoramento B – Bairro Centro - Residência.....	20
4.1.3	Seleção dos dias utilizados na calibração dos modelos	21
4.1.4	Dispositivos de geração, leitura e armazenamento de dados de consumo de água ao longo do tempo.....	22
4.2	Modelos estocásticos para a geração das séries sintéticas	27
4.2.1	Modelo dos pulsos retangulares de Neyman Scott	27
4.2.2	Modelo dos Pulsos Totais	29
4.3	Métodos de subtração e adição das demandas	32
4.3.1	Método de subtração de demandas	33
4.3.2	Método de adição de demandas.....	34
4.4	Demais métodos utilizados.....	39

4.4.1	Método de Iman e Conover	39
4.4.2	Método de otimização <i>Shuffled Complex Evolution</i> – SCE-UA	39
4.5	Algoritmos	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	Modelo OP	44
5.1.1	Calibração.....	44
5.2	Modelo NSRP.....	56
5.2.1	Calibração.....	56
5.3	Geração das séries sintéticas	64
5.3.1	Modelo OP	64
5.3.2	Modelo NSRP.....	76
5.3.3	Modelo OP modificado vs NSRP modificado.....	87
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	94
	REFERÊNCIAS.....	97
	APÊNDICE A – ALGORÍTIMOS	101

1 INTRODUÇÃO

A compreensão do comportamento da demanda de água residencial, considerando sua variabilidade espacial e temporal, é de fundamental importância no dimensionamento e gerenciamento de sistemas de abastecimento de água. Em grandes e médias cidades brasileiras, a demanda de água voltada ao abastecimento residencial pode representar a parcela de uso de água predominante nestes sistemas. Por exemplo, durante o ano de 2016, os volumes de água micromedidos nas economias residenciais ativas dos municípios de São Paulo/SP, Campinas/SP e Ribeirão Preto/SP representaram aproximadamente 75,8%, 86,0% e 71,2%, respectivamente, dos volumes totais consumidos nos respectivos sistemas públicos de abastecimento (SNIS, 2018).

Tradicionalmente, durante a modelagem de redes de distribuição de água para abastecimento, quando não se dispõem de dados reais de variação espacial e temporal de demanda de água nos nós de rede, utilizam-se curvas de variação horária que assumem padrões de demanda globais típicos e negligenciam as reais magnitudes das variações temporais e espaciais de demanda. A modelação de redes a partir destes tipos de curvas pode mascarar o real comportamento do escoamento, principalmente em tubulações secundárias e nas áreas periféricas dos sistemas de distribuição, afetando as previsões de qualidade e quantidade da água ofertada aos usuários (BUCHBERGER; WU, 1995).

A modelação da qualidade da água nas redes de distribuição é fortemente influenciada pelos tipos de modelos hidráulicos utilizados na determinação das características do escoamento de água nas tubulações. Modelos que buscam representar o escoamento a partir de altos graus de agregação espacial e temporal (nós de rede com extensa área de abrangência e curvas de variação temporal com resolução de ordem horária) prejudicam a análise dos períodos em que há estagnação do escoamento da água nas tubulações, geralmente danosos à qualidade da água no sistema (ALVISI; FRANCHINI; MARINELLI, 2003). Para esses casos, há necessidade da adoção de modelos que permitam a avaliação do sistema em baixos níveis de agregação espacial e temporal.

Visando caracterizar de forma apropriada a demanda instantânea de água residencial (usuário final), foram propostos dois tipos de abordagens: modelos que utilizam processos estocásticos e que buscam representar a demanda de água total dos usuários; modelos que buscam reproduzir as demandas dos diversos componentes que integram o uso residencial (p. ex., modelo SIMDEUM, proposto por Blokker, 2010).

Os modelos estocásticos que buscam representar a demanda de água residencial total podem ser baseados em processos como os de pulsos retangulares de Poisson (Buchberger e Wu, 1995; Guercio *et al.*, 2001; Garcia *et al.*, 2004; Yamanaka *et al.*, 2006) e pulsos retangulares de Neyman Scott (Alvisi *et al.*, 2003; Yamanaka *et al.*, 2012). Estes últimos modelam a demanda residencial individual total a partir da caracterização de blocos de demanda elementares, ou de processos que reproduzam diretamente o consumo agregado residencial individual, como através do modelo dos Pulsos Totais (DI PALMA *et al.*, 2014).

Por outro lado, informações estatísticas relacionadas às formas de uso da água nos domicílios, com caracterização dos aparelhos hidrossanitários que o compõem, podem ser utilizadas para a reprodução indireta da demanda de água domiciliar total a partir da combinação dos seus microconstituintes, como realizado através do modelo SINDEUM (CREACO; BLOKKER; BUCHBERGER, 2017).

Com o aperfeiçoamento dos modelos e suas capacidades de reproduzir de forma estaticamente significativa as demandas de usuários individuais em séries com resolução da ordem de minutos (simulações com baixos níveis de agregação espacial e temporal), há crescente preocupação voltada ao desenvolvimento de técnicas que permitam flexibilizar sua utilização no dimensionamento e gerenciamento de redes de distribuição de água. Para estes casos, geralmente há necessidade de agregar as séries originalmente geradas para usuários individuais, de forma que o resultado represente um conjunto de usuários (maior nível de agregação espacial) e de maneira a apresentar a precisão adequada. Para tanto, a compreensão das leis de escala que relacionam os parâmetros estatísticos das séries geradas ao número de usuários agregados é essencial (VERTOMMEN; MAGINI; CUNHA, 2014).

Atualmente, os modelos estocásticos de demanda de água mais difundidos têm sido validados através de monitoramentos realizados em sistemas caracterizados por abastecimento direto de água, e que, portanto, não contam com reservatórios domiciliares (caixas d'água). No Brasil, há predomínio do sistema de abastecimento majoritariamente indireto, em que a maior parte dos pontos de consumo domésticos são abastecidos através de reservatório domiciliar.

De forma geral, a utilização destes reservatórios nos domicílios altera significativamente o padrão temporal da demanda de água devido à atenuação dos picos de vazão. Atribui-se a esse comportamento os efeitos causados pela utilização de válvulas de controle de fluxo do tipo “boia” nos reservatórios domiciliares, que limitam a vazão nos períodos em que o reservatório encontra-se praticamente cheio, propiciando a ocorrência de baixos valores de vazão afluente aos domicílios e contribuindo para o incremento do fenômeno de submedição dos volumes de água registrados pelos hidrômetros (SILVA; DE PÁDUA; BORGES, 2016).

Nesse contexto, o presente trabalho busca avaliar e comparar modelos estocásticos de demanda de água, através da estimação de parâmetros para usuários abastecidos direta ou indiretamente por reservatório domiciliar.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho de pesquisa teve como objetivo geral a modelação da demanda de água de usuários residenciais individuais com perfis de abastecimento distintos, através dos modelos dos Pulsos Retangulares de Neyman Scott (NSRP) e dos Pulsos Totais (OP).

Os objetivos específicos do trabalho compreendem:

- a) desenvolver um dispositivo *datalogger* apropriado e realizar o monitoramento da demanda de água dos domicílios selecionados;
- b) desenvolver método para a mitigação dos efeitos negativos relacionados à utilização do reservatório domiciliar na modelação da demanda de água de usuários residenciais individuais; e
- c) avaliar o desempenho dos modelos NSRP e OP em reproduzir a demanda monitorada de usuários individuais, considerando as modificações propostas para a etapa de calibração e simulação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Modelos estocásticos para a representação da demanda de água doméstica

A busca por modelos hidráulicos que possibilitem a reprodução acurada do padrão temporal de demanda de água em baixos níveis de agregação espacial e temporal (p. ex., poucos usuários e tempos de discretização da ordem de minutos), caracterizados por consumos instantâneos e esporádicos, tem recebido crescente interesse na literatura especializada. A correta modelação destes cenários, característicos de tubulações secundárias e de áreas periféricas da rede de distribuição, é crucial para a determinação das pressões e dos tempos de residência da água nas tubulações, e suas relações com a qualidade da água ofertada (ALVISI; FRANCHINI; MARINELLI, 2003).

Neste contexto, nas últimas duas décadas foram propostos vários modelos que levam em consideração a natureza estocástica da demanda de água observada em baixos níveis de agregação espacial/temporal. De forma geral, parte dos modelos mais difundidos atualmente se originaram do campo da hidrologia (GARGANO *et al.*, 2015), através da analogia entre a representação da ocorrência de eventos de chuva e de demanda de água em redes de abastecimento, e buscam reproduzir de forma satisfatória a variabilidade da demanda de água de usuários individuais para altas resoluções temporais, da ordem de minutos.

Buchberger e Wu (1995) realizaram os primeiros estudos sistemáticos na área, propondo a modelação da demanda de água residencial baseada em pulsos retangulares de Poisson (PRP). Modelos baseados em PRP descrevem os eventos de chegada dos pulsos com base em processos de Poisson, constituídos por parâmetros básicos, como taxa de ocorrência, duração e intensidade dos pulsos. A obtenção destes parâmetros tem sido realizada de forma direta, através da identificação dos pulsos elementares que constituem a série de demanda monitorada. Para tanto, é necessário o uso de equipamentos sofisticados, como medidores com resolução temporal elevada (p. ex., 1 segundo) e com alta capacidade de armazenamento de dados, além de elevado esforço computacional para o tratamento final dos dados (YAMANAKA; TZATCHKOV; CORTES, 2012).

Para os modelos baseados em processos PRP, cada evento de demanda é associado a um único pulso, cujo início é definido por um processo de Poisson. Com abordagem similar, modelos baseados em processos de *cluster* foram propostos (ALVISI; FRANCHINI; MARINELLI, 2003; YAMANAKA; TZATCHKOV; CORTES, 2012; CREACO *et al.*, 2016). Segundo estes modelos, cada evento de demanda é associado a diversos pulsos diferentes, formando blocos, cujos inícios também são determinados por processos de Poisson.

Sem recorrer a identificação dos pulsos que geram cada evento de demanda, Gargano *et al.* (2015) propuseram o modelo dos Pulsos Totais (OP), segundo o qual não se busca a representação dos pulsos elementares de demanda de água que correm no interior dos domicílios, e sim a representação direta do consumo agregado, tal qual registrados pelos hidrômetros.

Em uma abordagem diferenciada, (BLOKKER, 2006) propuseram reproduzir a demanda de água residencial total partindo dos seus microcomponentes, utilizando informações estatísticas relacionadas aos usuários, aos aparelhos hidrossanitários disponíveis e aos seus usos finais, através do gerador SIMDEUM. Diferentemente dos demais modelos citados, a parametrização do SIMDEUM não é realizada a partir análise de medições prévias de consumo, mas com base em informações estatísticas relacionadas aos ocupantes das residências e seus hábitos, além da caracterização e quantificação dos aparelhos hidrossanitários residenciais.

3.1.1 Modelo dos pulsos retangulares de Neyman Scott

Nas últimas décadas, a utilização de processos estocásticos para a representação de eventos de chuva tem sido objeto de numerosos estudos. O reconhecimento das similaridades entre estes eventos chuvosos e os que caracterizam o consumo doméstico em baixos níveis de agregação espacial e temporal possibilitou a utilização de técnicas já abordadas no campo da hidrologia para modelagem da demanda doméstica. Entre estas técnicas, encontra-se o modelo de pulsos retangulares de Neyman Scott.

Cowpertwait *et al.* (1995) utilizaram esta técnica para a modelação de eventos de chuva, os quais são representados por agregados de “células de chuva”. A ocorrência dos blocos segue um processo estocástico de Poisson, sendo que para cada bloco se associa um número aleatório de células de chuva. A intensidade da chuva, para cada instante, é representada pela soma das intensidades das células de chuva que compõem o bloco.

Alvisi (2003) relacionou a ocorrência de blocos de chuva à de blocos de demanda de água -DB (do inglês *demand blocks*), formados por pulsos retangulares individuais de demanda elementar -ED (do inglês *elementary demand*). A ocorrência de cada início de DB segue um processo de Poisson. Para cada DB, associa-se um número aleatório e independente de ED (representado pela distribuição de Poisson), que possui duração e intensidade representadas pela distribuição exponencial. A origem de cada ED não necessariamente coincide com a do DB, podendo se situar a uma distância temporal deste, também representada por uma variável

distribuída exponencialmente. Como resultado, a demanda de água ao longo do tempo é obtida através da soma das intensidades das ED para cada intervalo de tempo considerado.

Na Tabela 3.1 são mostradas as analogias utilizadas entre as variáveis do processo de Neyman Scott aplicados à modelagem de chuva e à de demanda de água.

Tabela 3.1 - Analogias entre as variáveis do modelo dos pulsos retangulares de Neyman Scott aplicado à modelagem da chuva e de demanda de água. Fonte: adaptado de Yamanaka *et al.*, 2012.

Variável	Chuvas	Consumo de água potável
$Y(t)$	Intensidade acumulada da chuva	Volume acumulado de água (soma dos volumes dos pulsos)
$Xu(\tau)$	Intensidade do pulso de chuva	Intensidade do pulso de demanda
$N(t)$	Número de pulsos em um evento de chuva	Número de pulsos em um evento de consumo de água
μ_c	Média do número de pulsos em um evento de chuva	Média do número de pulsos em um evento de demanda de água

Na Figura 3.1 é mostrado um esquema de representação do modelo de Neyman Scott aplicado à demanda de água residencial.

Figura 3.1 - Representação do modelo Neyman Scott aplicado à demanda residencial. Fonte: adaptado de Cowpertwait *et al.*, 1995.

A descrição detalhada do procedimento de geração da série sintética é apresentada no item 4.2.1.

3.1.2 Modelo dos Pulsos Totais

Os modelos baseados em pulsos retangulares de Poisson visam representar a demanda de água total domiciliar, para cada instante considerado, como o somatório da demanda na forma de pulsos elementares provenientes dos diversos aparelhos sanitários que integram o uso doméstico da água.

Buscando a modelação do consumo doméstico através de abordagem diferenciada, Di Palma *et al.* (2014) propuseram o modelo dos Pulsos Totais, cujo foco é a representação dos blocos de demanda de forma direta, sem a reconstrução baseada em pulsos elementares. Apesar de conceitualmente diferente, o modelo descreve a demanda de água através de três variáveis (análogas às dos modelos PRP e NSRP): frequência, duração e intensidade dos pulsos de demanda agregada.

No modelo dos Pulsos Totais, a variável que descreve a frequência dos pulsos está associada à distribuição de Bernoulli, enquanto que a duração e a intensidade de cada pulso são descritas por distribuições exponenciais. Além disso, o fenômeno da persistência de demanda é considerado (pulsos de demanda ocorrendo por mais de um intervalo de tempo), introduzindo-se uma variável randômica discreta que representa a probabilidade de manutenção da mesma intensidade de demanda por mais de um intervalo de tempo (DI PALMA *et al.*, 2014; GARGANO *et al.*, 2015). Na Tabela 3.2 são descritas as principais variáveis envolvidas neste modelo.

Tabela 3.2 – Principais variáveis que descrevem o modelo dos Pulsos Totais (OP)

Variável	Descrição
$p(i)$	Probabilidade de ocorrência do bloco de demanda no instante i
τ	Duração do bloco de demanda
q	Intensidade da demanda

De forma geral, Di Palma *et al.* (2014) definiram a série sintética de demanda de água através dos seguintes passos: determinação do início dos blocos de demanda (passo 1); atribuição da demanda dos blocos (passo 2); atribuição da intensidade de demanda para cada intervalo de duração do bloco (passo 3). Os passos 1, 2 e 3, apresentados de forma esquemática na Figura 3.2, são feitos com base no Método de Monte Carlo, e são descritos detalhadamente no item 4.2.2.

Figura 3.2 – Representação dos passos que constituem o modelo dos Pulsos Totais. Fonte: adaptado de Gargano *et al.*, 2015.

3.1.3 Distribuições de probabilidade das variáveis intensidade e duração dos pulsos de demanda

A escolha das distribuições de probabilidade mais adequadas para os parâmetros aleatórios que regem os modelos estocásticos, como o NSRP e o OP, é fundamental para a obtenção de séries sintéticas de demanda de água que reproduzam as propriedades estatísticas observadas.

Nesse âmbito, para a reprodução da intensidade e da duração dos pulsos de demanda de água de usuários individuais, estudaram-se a aplicação de diversas distribuições de probabilidade. Por exemplo, Alvisi *et al.* (2003), Yamanaka *et al.* (2006) e Gargano *et al.* (2014) utilizaram a distribuição exponencial para a representação da intensidade e da duração dos pulsos. Guercio *et al.* (2001) utilizaram a distribuição exponencial apenas para a intensidade, empregando a distribuição normal para a duração. Garcia *et al.* (2004) fizeram uso das distribuições de Weibull e exponencial para a intensidade e duração, respectivamente. Buchberger *et al.* (2003) e Creaco *et al.* (2015) empregaram a distribuição lognormal para ambas, intensidade e duração. Na Tabela 3.3 encontra-se um resumo destas informações.

Tabela 3.3 – Exemplos do uso de distribuições de probabilidade das variáveis intensidade e duração do pulso de demanda de água

Autores (exemplo)	Modelo	Distribuições de probabilidade	
		Intensidade do pulso	Duração do pulso
Alvisi <i>et al.</i> (2003, Yamanaka <i>et al.</i> (2006)	NSRP	Exponencial	Exponencial
Gargano <i>et al.</i> (2014)	OP	Exponencial	Exponencial
Guercio <i>et al.</i> (2001)	PRP	Exponencial	Normal
Garcia <i>et al.</i> (2004)	PRP	Weibull	Exponencial
Buchberger <i>et al.</i> (2003), Creaco <i>et al.</i> (2015)	PRP	Lognormal	Lognormal

Todos os trabalhos exemplificados na Tabela 3.3 partiram do pressuposto de que a intensidade e a duração dos pulsos de demanda podem ser representadas por variáveis independentes entre si. Porém, há indicativo de que existe correlação positiva entre ambas. Nos casos em que essa correlação foi considerada, houve melhora na reprodução de certas propriedades estatísticas da série de demanda monitorada. No entanto, o emprego de uma nova variável no modelo (correlação) pode tornar o processo de parametrização mais custoso (CREACO *et al.*, 2015).

3.2 Agregação espacial e temporal de séries sintéticas

Com o aperfeiçoamento dos modelos estocásticos de demanda de água voltados à reprodução do consumo doméstico individualizado, surgiu crescente atenção direcionada aos estudos de técnicas que possibilitem obter dados de demanda de água para níveis mais elevados de agregação espacial e temporal (p. ex., demanda horária de grupos de 200 usuários residenciais) a partir da modelação realizada para baixos níveis de agregação.

Alvisi *et al.* (2003) observaram que a reconstrução de séries sintéticas de grandes grupos de usuários (elevada agregação espacial) a partir da simples soma de séries sintéticas obtidas para usuários individuais se mostrou inadequada na reprodução da variância da série sintética agregada. Segundo o autor, este fato se deve principalmente à incapacidade de reprodução das reais correlações espaciais e temporais ao somar séries sintéticas geradas de forma independente entre si.

De fato, ao analisar as demandas de água de grupos domiciliares monitorados em diferentes níveis de agregação espacial e temporal, Moughton *et al.* (2006) observaram

significativa correlação entre as séries. Foi verificado inclusive que a correlação entre as demandas de água aumenta, conforme aumentam-se os níveis de agregação espacial e temporal.

Esta correlação causa influência direta na variância da série de consumo de usuários espacialmente agregados, pois apesar de a média da soma entre variáveis aleatórias poder ser representada como a soma das médias destas, a correta representação da soma de suas variâncias acontece apenas quando se reproduzem as covariâncias das variáveis originais (MORETTIN; BUSSAB, 2000; ALVISI; ANSALONI; FRANCHINI, 2013).

Magini *et al.* (2008) confirmaram o incremento linear da média da demanda de água com o aumento do número dos usuários, e observaram a não linearidade da variância em função do nível de agregação espacial e temporal, mostrando que as correlações espaciais e temporais podem interferir consideravelmente na precisão de reprodução séries sintéticas agregadas.

Conforme observado por Alvisi, Ansaloni e Franchini (2013), as correlações entre as séries sintéticas geradas de forma independente podem ser introduzidas posteriormente às suas gerações, através do procedimento proposto por Iman e Conover (1982), que busca reordenar as amostras sintéticas de demanda de água de forma a impor as correlações monitoradas para grupos agregados de usuários.

3.3 Micromedição do consumo de água

A micromedição corresponde à medição do consumo de água do usuário no ponto de entrega final do serviço do abastecimento de água, fazendo-se uso de micromedidores, também denominados hidrômetros. De forma geral, com a micromedição busca-se estabelecer um sistema de cobrança pelo uso da água proporcional ao volume consumido (TSUTIYA, 2004).

Conforme estabelecido pela Portaria INMETRO 436/2011, o micromedidor deve medir continuamente e memorizar o volume de água de água que o atravessa, devendo incluir, no mínimo, um transdutor de medição e dispositivos calculador e indicador.

Os hidrômetros podem ser classificados a partir das suas características construtivas, princípios de funcionamento e classe metrológica. Quanto às características construtivas e princípios de funcionamento, classificam-se como:

- a) hidrômetros velocimétricos (taquimétrico): hidrômetros cujo acionamento é determinado em função da ação da velocidade da água sobre um componente móvel (turbina ou hélice). Podem ser do tipo monojato, quando o acionamento do mecanismo medidor é feito a partir da ação de apenas um jato de água sobre o componente móvel, ou multijato, quando existe a ação de diversos jatos tangenciais sobre o mecanismo medidor para o seu acionamento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997);
- b) hidrômetros volumétricos: hidrômetros cujo acionamento é determinado em função do enchimento e esvaziamento de câmaras de volume determinado (componente móvel), sob a ação da passagem da água. Os componentes móveis mais comumente empregados nos hidrômetros volumétricos são do tipo disco nutante e êmbolo rotativo. De forma geral, estes micromedidores caracterizam-se por serem mais precisos em relação aos do tipo velocimétrico, possuindo alta sensibilidade às baixas vazões (TSUTIYA, 2004; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, 2009).

No Brasil há ampla utilização de hidrômetros velocimétricos do tipo multijato devido à qualidade satisfatória e ao baixo custo em relação ao medidor volumétrico (DA SILVA, 2008). Nas Figuras 3.3 e 3.4 são mostrados esquemas de funcionamento de hidrômetros velocimétricos e volumétricos (êmbolo rotativo).

Figura 3.3 – Esquema de funcionamento do hidrômetro do tipo velocimétrico. Fonte: Tsutiya, 2004.

- a - Os compartimentos 1 e 2 se enchem enquanto os compartimentos 3 e 4 se esvaziam.
b - O compartimento 4 completamente vazio desapareceu e o compartimento 2 está totalmente cheio.
c - O compartimento 2 da figura precedente tornou-se o compartimento 4 e se esvazia. Um novo compartimento 2 aparece e se enche.
d - O compartimento 3 completamente vazio desapareceu. O compartimento 1 está cheio e vai se esvaziar.

Figura 3.4 – Esquema de funcionamento do hidrômetro do tipo volumétrico de êmbolo rotativo. Fonte: adaptado de Tsutiya, 2004.

Quanto à classificação metrológica, os hidrômetros podem ser classificados entre classes, que variam de A a D (ISO 4064, 1993) ou A a C (INMETRO, 2000) e indicam o seu grau de precisão. Cada classe apresenta faixas de vazão mínima ($Q_{\min}$), vazão de transição (Q_t), vazão máxima ($Q_{\max}$) e vazão nominal (Q_n), as quais devem ser respeitadas de acordo com a legislação vigente. Na Tabela 3.4 apresentam-se as principais características metrológicas dos hidrômetros das classes A a C, conforme categorização proposta pela Portaria 246/2000 do INMETRO.

Tabela 3.4 - Classes metrológicas e correspondentes valores de $Q_{\min}$ e Q_t . Fonte: INMETRO, 2000.

Classes metrológicas		Vazão nominal (m^3/h)									
		0,6	0,8	1,0	1,5	2,5	3,5	5,0	6,0	10,0	15,0
A	$Q_{\min}$ (m^3/h)	0,024	0,030	0,040	0,040	0,100	0,140	0,200	0,240	0,400	0,600
	Q_t (m^3/h)	0,060	0,075	0,100	0,150	0,250	0,350	0,500	0,600	1,000	1,500
B	$Q_{\min}$ (m^3/h)	0,012	0,015	0,020	0,030	0,050	0,070	0,100	0,120	0,200	0,300
	Q_t (m^3/h)	0,048	0,060	0,080	0,120	0,200	0,280	0,400	0,480	0,800	1,200
C	$Q_{\min}$ (m^3/h)	0,006	0,008	0,010	0,015	0,025	0,035	0,050	0,060	0,100	0,150
	Q_t (m^3/h)	0,009	0,011	0,015	0,023	0,038	0,053	0,075	0,090	0,150	0,225

A avaliação da eficiência de medição dos hidrômetros é feita a partir da caracterização dos erros de indicação, conforme procedimentos descritos pela NBR 15538/2011, com a determinação da curva de erros (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Exemplo de curva de erros de medição em hidrômetros. Fonte: Da Silva (2008)

3.4 Efeitos da utilização de reservatórios particulares na micromedição do consumo de água

A NBR 5626/1998 classifica o tipo de abastecimento de água das instalações prediais de acordo com a forma com que o abastecimento do ponto de utilização é efetuado. Classifica-se o abastecimento como do tipo direto quando a água provém diretamente da fonte de abastecimento. Já quando a água provém de um reservatório privado (caixa d'água), classifica-se como indireto.

Em diversos países, a utilização de reservatórios privados tem sido creditada à mitigação dos efeitos negativos relacionados à intermitência no fornecimento de água dos sistemas de abastecimento, visando prover abastecimento temporário para o consumo cotidiano quando o suprimento de água não está disponível (CUBILLO, 2004; COBACHO *et al.*, 2008)

Porém, a utilização de tais reservatórios pode relacionar-se a diversos efeitos negativos para o sistema de abastecimento, dentre os quais se destacam: aumento das perdas reais (manutenção inadequada dos seus componentes, como a válvula de controle da caixa d'água); aumento das perdas aparentes (ocorrência do fenômeno de submedição nos hidrômetros); deterioração da qualidade da água (relacionado às condições inadequadas de limpeza das caixas d'água e ao decaimento do cloro residual presente na água) (COBACHO *et al.*, 2008; KRUGER, 2001).

O efeito do aumento das perdas aparentes, típico de domicílios em que há utilização da caixa d'água com válvula de controle tipo “boia”, se relaciona às baixas vazões que ocorrem no ciclo final de enchimento do reservatório, no qual há quase total obstrução da válvula de controle (SILVA; DE PÁDUA; BORGES, 2016). As perdas aparentes podem ser potencializadas quando há uso de reservatórios privados com maiores áreas de superfície (CRIMINISI *et al.*, 2009).

O incremento da frequência de ocorrência de baixas vazões de consumo de água nos domicílios que utilizam a caixa d'água foi constatado por Mutikanga *et al.* (2011), ao estudarem o consumo de 90 consumidores da cidade de Kampala, Uganda (60 domésticos, 25 comerciais e 5 institucionais). Os usuários que possuíam reservatório privado de abastecimento de água registraram submedição média dos hidrômetros de 25 % do total do volume consumido. Já para os usuários abastecidos diretamente, registrou-se submedição média de 7%.

A submedição nos hidrômetros pode ser amplificada em reservatórios que permanecem constantemente cheios devido ao seu contínuo abastecimento ao longo do dia. Em

monitoramento do consumo de água de cinco domicílios da cidade de Palermo, Itália, Criminisi *et al.* (2009) verificaram submedição de até 49% nos domicílios cujos reservatórios permaneciam continuamente cheios e até 8% nos reservatórios abastecidos intermitentemente. A redução da submedição dos usuários que possuíam reservatórios abastecidos intermitentemente foi creditada à ocorrência de vazões maiores durante os períodos de enchimento das caixas d'água, para as quais há maior sensibilidade dos hidrômetros.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Aquisição de dados

O monitoramento do consumo de água ao longo do tempo foi realizado em residências com diferentes perfis de abastecimento, conforme mostrado a seguir:

- a) Perfil 1: residências nas quais os aparelhos hidrossanitários são abastecidos predominantemente por reservatório domiciliar (abastecimento predominantemente indireto);
- b) Perfil 2: residências nas quais os aparelhos hidrossanitários são abastecidos de forma mista, com predomínio do abastecimento direto (sem intermédio de reservatório domiciliar).

Para o monitoramento dos usuários de Perfil 1, foram selecionadas 3 residências localizadas no condomínio “Parque Fehr”, da cidade de São Carlos, São Paulo. Para o Perfil 2, foi selecionada residência localizada no Centro da cidade de São Carlos. Na Tabela 4.1 são mostradas as principais características relacionadas às localizações das residências selecionadas para a aquisição de dados.

Tabela 4.1 – Perfil, e localização das residências analisadas

Perfil	Residência	Bairro	Cidade
1	1	Parque Fehr	São Carlos
	2	Parque Fehr	São Carlos
	3	Parque Fehr	São Carlos
2	4	Centro	São Carlos

4.1.1 Monitoramento A – Parque Fehr

O condomínio “Parque Fehr” se localiza na região noroeste da cidade de São Carlos, como mostrado na Figura 4.1.

Conforme informações fornecidas pelo SAAE – São Carlos, o condomínio conta com 873 ligações de água (levantamento realizado no mês de fevereiro de 2018), as quais podem ser classificadas de acordo com os tipos e faixas de consumo apresentadas nas Tabelas 4.2 e 4.3. Seu consumo de água mensal registrado durante o ano de 2017 é mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.2 – Quantidade de ligações por categoria no Parque Fehr

Categoria	Número de ligações
Residencial	858
Comercial	13
Pública municipal	2
Total	873

Tabela 4.3 – Quantidade de ligações por faixa de consumo no Parque Fehr (mês de fevereiro de 2018).
Fonte: SAAE (2018).

Faixa de consumo (m ³ /mês)	Número de ligações	Consumo total de água (m ³)
0 a 10	268	1.349
11 a 15	210	2.710
16 a 25	316	6.173
26 a 40	73	2.172
41 a 60	5	213
61 a 100	1	87
> 100	0	0
Total	873	12.704

O condomínio Parque Fehr apresenta rede de abastecimento de água setorizada, sem conexão com os bairros adjacentes. Seu abastecimento é realizado a partir do reservatório elevado “Parque Fehr”, que recebe água do poço “Parque Fehr”. As características do reservatório são descritas a seguir:

- a) volume útil: 200 m³;
- b) formato: cilíndrico;

O monitoramento no condomínio Parque Fehr consistiu na aquisição de dados de consumo de água ao longo do tempo de 3 residências a partir da substituição dos seus hidrômetros por hidrômetros do tipo volumétrico, classe C, com saída pulsada, dotados de geradores de pulso com sensores magnéticos e *dataloggers* desenvolvidos para esse fim (as características dos equipamentos utilizados são descritas no item 4.1.4).

Na Figura 4.2 é mostrado um esquema que ilustra o processo de aquisição de dados realizado no condomínio Parque Fehr.

Figura 4.2 – Esquema do processo de aquisição de dados realizado no condomínio Parque Fehr

O período de abrangência do Monitoramento A é mostrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Período de abrangência do Monitoramento A

Residência	Período de monitoramento
1	01/03/2017 a 19/12/2017
2	09/04/2017 a 15/12/2017
3	09/04/2017 a 14/12/2017

4.1.2 Monitoramento B – Bairro Centro - Residência

Adicionalmente ao monitoramento realizado no condomínio Parque Fehr, foi feita a medição do consumo de água ao longo do tempo de 1 residência localizada no bairro Centro da cidade de São Carlos, conforme descrito na Tabela 4.1. Na Figura 4.3 apresenta-se, de forma esquemática, a localização da residência monitorada.

Figura 4.3 - Esquema com a localização da Residência 4 (“Monitoramento B”) no município de São Carlos

Como descrito no item 4.1, categoriza-se o abastecimento de água da residência como misto, porém predominantemente direto (Perfil B), sendo que os únicos aparelhos hidrossanitários abastecidos por intermédio do reservatório domiciliar são 2 chuveiros.

O Monitoramento B consistiu na aquisição de dados de consumo de água ao longo do tempo a partir da instalação de um hidrômetro volumétrico classe C adicional localizado imediatamente a jusante do barrilete do hidrômetro da concessionária (Figura 4.9). O hidrômetro adicional instalado foi equipado com gerador de pulsos dotado de sensor magnético e *datalogger* para o armazenamento dos dados. As principais características destes equipamentos são descritas no item 4.1.4.

4.1.3 Seleção dos dias utilizados na calibração dos modelos

As séries de dados provenientes dos monitoramentos A e B foram segregadas, de forma que apenas os dias úteis típicos foram utilizados para a calibração dos modelos. Considerou-se como dia útil típico todos os dias monitorados, excluindo-se os sábados e domingos (feriados e demais datas festivas foram mantidas).

Além disso, foram removidos da calibração todos os dias que apresentaram intervalos maiores ou iguais a 8 horas sem consumo.

4.1.4 Dispositivos de geração, leitura e armazenamento de dados de consumo de água ao longo do tempo

Para o monitoramento do consumo de água das residências analisadas ao longo do tempo, foram utilizados medidores de vazão volumétricos modelo Altair Classe C, da fabricante Diehl, com vazão nominal de 1,5 m³/h, DN ¾”, com relojoaria apta à instalação de sensor/emissor de pulsos. As principais características dos hidrômetros utilizados são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 -Principais características de funcionamento dos hidrômetros utilizados

Item	Descrição
Diâmetro nominal (mm)	20
Vazão máxima - $Q_{\text{máx}}$ (m ³ /h)	3
Vazão nominal - Q_n (m ³ /h)	1,5
Vazão de transição - Q_t (L/h)	22,5
Vazão mínima - $Q_{\text{mín}}$ (L/h)	15
Início de funcionamento típico (L/h)	2
Coefficiente de cálculo de perda de carga (bar)	5
Pressão máxima de trabalho (bar)	16

Acoplado às relojoarias foram posicionados os sensores/emissores de pulso modelo Izar Pulse I, da fabricante Diehl. O sensor utilizado é do tipo indutivo e faz a detecção do campo magnético rotativo do disco de metal presente na relojoaria do hidrômetro. Na Tabela 4.6 são mostradas as demais características do sensor/emissor de pulsos.

Tabela 4.6 - Principais características dos sensores/emissores de pulso

Item	Descrição
Sensor	Indutivo (Ti)
Princípio	Detecção do campo magnético rotativo do disco de metal
Tipo de saída	NPN, transistor coletor aberto
Resolução	1 pulso por 1 litro

Conforme indicado na Tabela 4.6, o sensor/emissor emite um pulso para cada litro de água medido pelo hidrômetro (leitura acumulada).

Na Figura 4.4 são apresentadas fotos do hidrômetro e do sensor/emissor de pulsos, respectivamente.

Figura 4.4 – Hidrômetro (esq.) sensor/emissor de pulsos (dir.)

Para possibilitar a obtenção da demanda de água das residências ao longo do tempo foram desenvolvidos *dataloggers*, que se conectam individualmente aos sensores/emissores de pulsos e possuem a função de registrar data e hora relativas à emissão de cada pulso gerado pelos sensores. Os *dataloggers* foram implementados a partir da plataforma eletrônica de *hardware* e *software* livre Arduino, utilizando-se essencialmente os seguintes componentes:

- Arduino Pro Mini (3,3 V/8 MHz);
- Módulo RTC DS3231;
- Módulo de cartão micro SD;

- d) Conjunto de baterias recarregáveis Li-íon, cada qual contendo 6 células de baterias 18650 em paralelo (4,2 V);
- e) Resistor de 220 Ω ;
- f) Plugs de alimentação do tipo “Jack J4” de 2,1 mm;
- g) Led vermelho de 3 mm.

Na Figura 4.5 é mostrado o esquema elétrico do *datalogger* desenvolvido.

Figura 4.5 – Esquemático do *datalogger*

Para a montagem e ligação dos componentes foram confeccionadas placas de circuito impressas – PCBs (*printed circuit board*) – cujo layout é mostrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Layout da PCB confeccionada

As PCBs e os conjuntos de baterias foram abrigados em caixas herméticas, instaladas nos cavaletes dos hidrômetros, como apresentado nas Figuras 4.7 a 4.9.

Figura 4.7 – Caixa hermética de abrigo da PCB e baterias

Figura 4.8 – Instalação nos cavaletes dos hidrômetros da Residência 1 (esq.) e 2 (dir.)

Figura 4.9 - Instalação nos cavaletes dos hidrômetros da Residência 3 (esq.) e 4 (dir.)

Por fim, a programação de cada *datalogger* foi feita utilizando-se o *software* de código aberto Arduino (IDE). O algoritmo desenvolvido analisa o estado lógico da entrada digital de leitura utilizada para o monitoramento do sensor. Caso o estado lógico seja alterado de “0” para “1”, indicando a leitura pelo sensor, aciona-se o LED de indicação de leitura e armazena-se a data e a hora da medição no cartão microSD, como ilustrado no esquema contido na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Esquema de funcionamento do algoritmo do *datalogger*

4.2 Modelos estocásticos para a geração das séries sintéticas

Para a geração das séries sintéticas de demanda de água, foram utilizados dois modelos distintos:

- modelo dos Pulsos Retangulares de Neyman Scott (*Neyman Scott Rectangular Pulse*, NSRP);
- modelo dos Pulsos Totais (*Overall Pulse*, OP).

4.2.1 Modelo dos pulsos retangulares de Neyman Scott

No Modelo dos Pulsos Retangulares de Neyman Scott (NSRP) há a representação da demanda ao longo do tempo a partir de células retangulares de demanda denominadas “demandas elementares” (DE) e seus respectivos agregados, denominados “blocos de demanda” (BD). Para a geração da série sintética de demanda, determina-se a frequência de chegada dos BD e DE, além das intensidades e durações de cada DE.

A origem dos BD é representada por um processo de Poisson com taxa de chegada λ . Cada BD é formado por um número aleatório de células de DE, sendo que a origem de cada DE é representada por uma variável aleatória, que descreve a distância entre a origem do BD e o início da DE, e possui distribuição exponencial com parâmetro β .

Cada célula de demanda elementar possui duração definida por uma variável aleatória com probabilidade representada pela distribuição exponencial com parâmetro η .

No método NSRP, define-se $Y_i^{(h)}$ como a demanda de água acumulada no instante i , com duração h .

$$Y_i^{(h)} = \int_{(i-1)h}^{ih} Y(t) dt \quad (4.1)$$

As expressões analíticas (COWPERTWAIT, 1995) para médias, variâncias e covariâncias de $Y_i^{(h)}$ são apresentados a seguir:

$$E[Y_i^{(h)}] = \frac{\lambda}{\eta} E[C] E[X] h \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} Var[Y_i^{(h)}] = & \left[\frac{\lambda}{\eta^3} (\eta h - 1 + e^{-\eta h}) \right] \left[2\mu_c E[X^2] + E[C^2 - C] \mu_x^2 \frac{\beta^2}{\beta^2 - \eta^2} \right] \\ & - \lambda (\beta h - 1 + e^{-\beta h}) E[C^2 - C] \mu_x^2 \left[\frac{1}{\beta(\beta^2 - \eta^2)} \right] \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} Cov[Y_i^{(h)}, Y_{i+k}^{(h)}] &= \left[\frac{\lambda}{\eta^3} (1 - e^{-\eta h})^2 e^{-\eta(k-1)h} \right] \left[\mu_c E[X^2] \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} E[C^2 - C] \mu_x^2 \frac{\beta^2}{\beta^2 - \eta^2} \right] \\ &- \lambda (1 - e^{-\beta h})^2 \left[\frac{1}{2} E[C^2 - C] \mu_x^2 \left[\frac{1}{\beta(\beta^2 - \eta^2)} \right] \right] e^{-\beta(k-1)h}, \\ &k \geq 1 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Para a utilização das equações 4.1 e 4.4 no modelo, é preciso que sejam adotadas distribuições de probabilidade para as variáveis C (número de pulsos por bloco de demanda) e X (intensidade de cada pulso). Neste trabalho, foram consideradas as mesmas distribuições adotadas por Alvisi, Franchini e Marinelli (2003) em estudo similar, sendo: distribuição de Poisson para a variável aleatória C e distribuição exponencial para X . Assim, obtém-se as relações mostradas a seguir, descritas por Cowpertwait (1995):

$$E[X] = \mu_x \quad (4.5)$$

$$E[X^2] = 2\mu_x \quad (4.6)$$

$$E[C] = \mu_c \quad (4.7)$$

$$E[C^2 - C] = \mu_c^2 - 1 \quad (4.8)$$

4.2.1.1 Parametrização

Para a obtenção dos parâmetros utilizados neste método ($\lambda, \mu_x, \mu_c, \eta, \beta$), foi utilizada a metodologia originalmente proposta por Cowpertwait *et al.* (1995) e adaptada de Alvisi, Franchini e Marinelli (2003) e Yamanaka *et al.* (2012), que consiste na busca dos valores dos parâmetros que minimizem a função objetivo apresentada na Equação 4.9, em que F'_1, F'_2 e F'_3 representam os momentos observados (média, variância e covariância observada), e F_1, F_2 e F_3 os momentos teóricos, descritos pelas Equações 4.2 a 4.4.

$$Z = \left[\left(\frac{F_1}{F'_1} - 1 \right)^2 + \left(\frac{F_2}{F'_2} - 1 \right)^2 + \left(\frac{F_3}{F'_3} - 1 \right)^2 \right] \quad (4.9)$$

Para a minimização da função objetivo supracitada foi utilizado o método de otimização de funções não lineares *Shuffled Complex Evolution* (DUAN *et al.*, 1992), descrito no item 4.4.2.

Destaca-se que, para considerar a não homogeneidade do processo de criação dos blocos de demanda ao longo do dia, foi realizada a divisão do dia em 12 intervalos com durações de 120 minutos. Para cada um destes intervalos foram obtidos diferentes conjuntos dos parâmetros a partir da minimização da Equação 4.9. Além disso, a parametrização foi feita considerando-se o intervalo de discretização temporal h igual a 1 min.

4.2.2 Modelo dos Pulsos Totais

O Modelo dos Pulsos Totais (OP) consiste em um método estocástico utilizado para a representação da demanda de água de usuários residenciais através da geração de séries sintéticas que representam diretamente o consumo total de água das residências para o intervalo de discretização adotado. Dessa forma, diferentemente do modelo NSRP, o método não busca a reconstrução dos pulsos de demanda unitária originados dos dispositivos hidrossanitários, mas representa diretamente a totalização destes pulsos, como observados a partir de um hidrômetro residencial.

A série sintética de demanda de água é gerada pelo modelo OP através de três variáveis:

- a) frequência de chegada do bloco;
- b) duração do bloco;

c) intensidade da demanda.

Nos itens a seguir são descritas estas variáveis.

4.2.2.1 Frequência de chegada do bloco

A probabilidade de ocorrência de demanda em cada instante da série gerada é calculada pela Equação 4.10. Destaca-se que, para se considerar o processo não homogêneo de chegada de demanda ao longo do dia (existem intervalos do dia nos quais observa-se maior frequência de chegada de demanda do que outros), atribui-se diferentes valores para a variável λ , conforme o intervalo do dia considerado.

$$P(i, j) = \lambda(i, j) \cdot \Delta t \quad (4.10)$$

em que, $P(i, j)$: probabilidade de ocorrência de bloco no intervalo i do dia j ; $\lambda(i, j)$: taxa de ocorrência de bloco no intervalo i do dia j ; Δt : intervalo de tempo analisado.

A taxa de ocorrência de bloco de demanda para cada intervalo i do dia j é calculada por:

$$\lambda(i, j) = \frac{N_{ah}(i)}{D - N_{ah}(i)(\mu_t - 1)} \quad (4.11)$$

em que, $N_{ah}(i)$: quantidade total de blocos gerados no intervalo diário i ; D : duração (min) dos intervalos diários nos quais λ é constante; μ_t : duração média dos blocos de demanda.

A determinação da variável N_{ah} , para cada intervalo diário i , é feita a partir da Equação 4.12.

$$N_{ah}(i) = \alpha_i \cdot N_{ad} \quad (4.12)$$

em que, $N_{ah}(i)$: quantidade total de blocos gerados no intervalo i ; N_{ad} : quantidade total de blocos gerados diariamente; α_i : coeficiente obtido para cada hora i do dia j .

Para cada dia da série gerada é atribuído um valor aleatório de número total de blocos de demanda, N_{ad} . Para tanto, foi considerado que a variável N_{ad} possui distribuição normal, com parâmetros μ_{Nad} e σ_{Nad} determinados experimentalmente. O coeficiente α_i também é determinado experimentalmente, conforme a seguinte relação:

$$\alpha_i = \frac{\mu_{Nah}(i)}{\mu_{Nad}} \quad (4.13)$$

em que, $\mu_{Nah}(i)$: média do número total de blocos de demanda do intervalo diário i (determinado experimentalmente); μ_{Nad} : média do número total diário de blocos de demanda (determinado experimentalmente).

4.2.2.2 Duração dos blocos

A variável τ , que representa a duração do bloco, é descrita pela distribuição exponencial, com a seguinte função de distribuição acumulada:

$$F[t] = 1 - e^{-bt} \quad (4.14)$$

$$b = \frac{1}{\mu_t} \quad (4.15)$$

em que, μ_t : duração média dos blocos de demanda (determinado experimentalmente).

4.2.2.3 Intensidade da demanda

Para modelar a intensidade da demanda, são descritas duas variáveis aleatórias: uma descreve a possibilidade de ocorrência de persistência de intensidade de demanda (quando a intensidade da demanda no intervalo “ i ” se repete no intervalo “ $i+1$ ”), enquanto a outra descreve a intensidade da demanda quando não há o fenômeno de persistência. Para a verificação da ocorrência de persistência de demanda, é utilizado o modelo de Bernoulli, enquanto que para a modelação da intensidade da demanda é utilizado o modelo exponencial, com a seguinte função de distribuição acumulada:

$$F[t] = 1 - e^{-yt} \quad (4.16)$$

$$y = \frac{1}{\mu_q} \quad (4.17)$$

em que, μ_q : intensidade média de demanda (determinado experimentalmente).

4.2.2.4 Parametrização

O modelo OP foi calibrado a partir da obtenção dos parâmetros N_{ad} , $N_{ah}(i)$, μ_τ e μ_q , pela análise dos dados experimentais, considerando-se:

- a) D : 120 min (divisão do dia em 12 intervalos com durações idênticas);

- b) Δt : 1 min (intervalo de discretização temporal adotado para a análise dos parâmetros e para a modelagem).

4.3 Métodos de subtração e adição das demandas

As séries de volume de água consumido ao longo do tempo obtidas através do monitoramento das residências realizado neste estudo são do tipo discretas, em função dos tipos de medidores empregados (hidrômetros – medidores de deslocamento positivo), que permitem o registro do acréscimo do volume consumido em intervalos de 1 L.

Para as residências monitoradas neste estudo, nas quais o consumo de água é majoritariamente indireto (residências 1 a 3) e sujeito às baixas vazões de consumo relacionadas à etapa de enchimento do reservatório individual (caixa d'água), observou-se a ocorrência predominante de valores de volume consumido iguais a 1 L (com duração de 1 min), como exemplificado na Figura 4.11, para as quais adotou-se o intervalo de discretização temporal de 1 min.

Figura 4.11 – Exemplo de série de consumo de água da Residência 3, com destaque para os valores de vazão predominantes

Buscando-se mitigar os efeitos negativos relacionados ao predomínio dos valores de demanda iguais a 1 L nas etapas de parametrização dos modelos utilizados neste estudo, foram elaborados métodos de subtração destes valores das séries observadas e de adição dos mesmos nas séries sintéticas geradas. Na Figura 4.12 é apresentado um esquema que contextualiza as etapas de subtração e adição das demandas no processo total da modelagem.

Figura 4.12 – Etapas de subtração e adição de demandas no contexto total do processo de modelagem

Os métodos de adição e subtração de demandas são descritos nos itens 4.3.1 e 4.3.2, respectivamente.

4.3.1 Método de subtração de demandas

O método de subtração de demandas consiste em subtrair o volume de 1 L de cada intervalo de tempo no qual foi registrado valor de volume consumido maior ou igual a 1 L. Na Tabela 4.7 é mostrado exemplo de série de demanda antes e após o processo de subtração.

Tabela 4.7 – Exemplo de fragmento de série de demanda antes e após ser submetida ao método de subtração de demandas

Série de demanda original		Série de demanda após o processo de subtração	
Data	Volume (L)	Data	Volume (L)
17/04/2017 10:21	1	17/04/2017 10:21	0
17/04/2017 10:22	0	17/04/2017 10:22	0
17/04/2017 10:23	0	17/04/2017 10:23	0
17/04/2017 10:24	4	17/04/2017 10:24	3
17/04/2017 10:25	6	17/04/2017 10:25	5
17/04/2017 10:26	5	17/04/2017 10:26	4
17/04/2017 10:27	0	17/04/2017 10:27	0
17/04/2017 10:28	0	17/04/2017 10:28	0

4.3.2 Método de adição de demandas

Este método consiste em adicionar valores de consumo iguais a 1 L em intervalos de tempo selecionados das séries de demanda sintéticas geradas pelos métodos OP e NSRP, de forma a reproduzir as principais estatísticas das séries observadas. Para tanto, este procedimento foi subdividido em duas partes, como indicado a seguir.

4.3.2.1 Parte 1) Cálculo do número total diário de intervalos de tempo nos quais serão adicionados os valores de consumo iguais a 1 L

Para o cálculo, foi assumido que o número diário de intervalos de tempo nos quais o consumo de água é maior ou igual a 1 pode ser descrito por uma variável aleatória “ N ” com distribuição lognormal e parâmetros μ_N (média) e σ_N (desvio padrão). Dessa forma, $NOBi$ corresponde ao número de intervalos de tempo nos quais o consumo de água é igual ou excede 1 L para cada dia i da série observada, e $NSINTi$ possui a mesma definição, porém relaciona-se à série sintética. Além disso, definiu-se como $VOBi$ o volume total diário de água consumido do dia i , calculado após o processo de subtração de demandas para cada série observada, e $VSINTi$ o volume total diário de água obtido pelos métodos NSRP ou OP para cada dia i . A

Tabela 4.8 apresenta de forma resumida as variáveis que integram a Parte 1 do Método de adição das demandas.

Tabela 4.8 – Variáveis do Método de adição das demandas – Parte 1

Variável	Descrição
<i>NOB</i>	Número diário de intervalos de tempo nos quais o consumo de água é maior ou igual a 1 (séries observadas de demanda, calculado antes do processo de subtração das demandas)
<i>NSINT</i>	Número diário de intervalos de tempo nos quais o consumo de água é maior ou igual a 1 (séries sintéticas de demanda, calculado antes do processo de adição das demandas)
<i>NSINT'</i>	Número diário de intervalos de tempo nos quais o consumo de água é maior ou igual a 1 (séries sintéticas de demanda, calculado para o processo de adição das demandas)
<i>VOB</i>	Volume diário de água consumido (séries observadas de demanda, calculado após o processo de subtração das demandas)
<i>VSINT</i>	Volume diário de água consumido (séries sintéticas de demanda, calculado antes do processo de adição das demandas)

O Método de Adição das Demandas – Parte 1 consiste nos seguintes procedimentos:

- 1) Obtenção dos parâmetros μ_{NOB} e σ_{NOB} que descreve a variável aleatória *NOB* a partir da série de observada de demanda;
- 2) Cálculo de $NOB=[NOB_1,...,NOB_i]$ para cada dia *i* da série observada de demanda;
- 3) Cálculo de $VOB=[VOB_1,...,VOB_i]$ para cada dia *i* da série observada de demanda, após o processo de subtração de demandas;
- 4) Obtenção dos coeficientes de correlação de Pearson, *r*, relativo ao conjunto de valores de *NOB* e *VOB*;
- 5) Geração de *n* valores aleatórios de $NSINT'=[NSINT_1,...,NSINT_n]$ (considerando-se a distribuição lognormal com parâmetros μ_{NOB} e σ_{NOB}), sendo *n* igual ao número de dias da série sintética de demanda gerada;
- 6) Cálculo de $VSINT=[VSINT_1,...,VSINT_n]$ para cada dia *n* da série sintética de demanda;
- 7) Reordenamento dos valores de $NSINT'=[NSINT_1,...,NSINT_n]$ para que as variáveis *NSINT'* e *VSINT* possuam valor de correlação de Pearson próximo de *r*, utilizando-se o método de Iman e Conover (ver item 4.4.1).

4.3.2.2 Parte 2) Seleção dos intervalos de tempo nos quais serão adicionados os valores de consumo iguais a 1L para posterior adição.

No Método de Adição das Demandas – Parte 1, foram determinados os procedimentos para o cálculo dos valores de $NSINT_i$ e $VSINT_i$, para cada dia i da série sintética, e a forma com que estes devem ser ordenados, de forma a preservar o valor de correlação da série de demanda observada. A Parte 2 deste método consiste nos procedimentos utilizados para adição dos valores de demanda igual a 1 L nos intervalos de tempo selecionados da série sintética. Destaca-se que o método leva em consideração o processo não homogêneo de ocorrência dos valores de 1 L ao longo do dia, utilizando-se o parâmetro α , usado originalmente no método OP (ver item 4.2.2).

Para cada dia i da série sintética, foram realizados os seguintes passos:

- 1) Adição do valor de 1 L em cada intervalo de tempo no qual o consumo de água é igual ou superior a 1 L;
- 2) Cálculo da probabilidade de ocorrência de valores de demanda igual a 1 nos intervalos de tempo sem demanda através da equação a seguir:

$$P_{jk} = \frac{(NSINT_i' - NSINT_i) \cdot \alpha_k}{Zk} \quad (4.18)$$

em que, P_{jk} : probabilidade de ocorrência de demanda igual a 1 L no intervalo de tempo j referente ao intervalo k do dia i ; $NSINT_i'$: número de intervalos de tempo do dia i nos quais o consumo de água é maior ou igual a 1, calculado na Parte 1; $NSINT_i$: número de intervalos de tempo do dia i nos quais o consumo de água é maior ou igual a 1 (séries sintéticas de demanda, calculado antes do processo de adição das demandas); Zk : número de intervalos de tempo sem demanda do intervalo k do dia i ; α_k : probabilidade de ocorrência de demanda, calculada conforme procedimento descrito no método OP (ver item 4.2.2), para cada intervalo k do dia i .

- 3) Adição dos valores de demanda igual a 1 L para cada intervalo de tempo discreto por Método de Monte Carlo, considerando as probabilidades de ocorrência descritas pela equação 4.18.

Nas Figuras 4.13 e 4.14 são ilustradas as partes 1 e 2 do Método de Adição das Demandas, respectivamente.

Figura 4.13 – Exemplo ilustrativo dos procedimentos que compõem o Método de Adição das Demandas – Parte 1

Passo 1

Adição do valor de 1 L nos intervalos de tempo em que a demanda é maior do que 0 L

Adição do valor de 1 L nos intervalos de tempo selecionados e que possuam demanda igual a 0 L por método de Monte Carlo

**Passos
2 e 3**

Figura 4.14 - Exemplo ilustrativo dos procedimentos que compõem o Método de Adição das Demandas – Parte 2

4.4 Demais métodos utilizados

4.4.1 Método de Iman e Conover

O método de Iman e Conover proporciona uma alternativa para a introdução de um determinado grau de correlação entre amostras de variáveis distintas. Este método é comumente utilizado nos casos em que variáveis aleatórias são geradas independentemente e precisam ser combinadas, mantendo-se inalteradas as suas distribuições marginais.

A descrição do método é mostrada a seguir:

- a) dados de entrada: matriz S de correlação desejada; matriz X ($n \times r$) que contém n valores de r variáveis que se deseja correlacionar;
- b) cálculo da matriz X^* de postos de X e determinação da sua matriz de correlação de Pearson, T . Decomposição da matriz de correlação T utilizando a fatoração de Cholesky, obtendo-se $T=ZZ'$, em que Z é uma matriz triangular inferior e Z' sua transposta;
- c) decomposição da matriz de correlação S utilizando a fatoração de Cholesky, obtendo-se $S=AA'$, em que A é uma matriz triangular inferior e A' sua transposta;
- d) cálculo da matriz $Y=X^*(ZA^{-1})'$ e reordenamento da matriz X de forma que sua matriz de postos coincida com a matriz de postos de Y , produzindo a matriz X^{**} reordenada com a correlação desejada.

4.4.2 Método de otimização *Shuffled Complex Evolution* – SCE-UA

O método *Shuffled Complex Evolution* (DUAN; GUPTA; SOROOSHIAN, 1993) foi concebido como uma alternativa efetiva e eficiente para a otimização de funções não lineares com características que representam elevado grau de dificuldade na resolução, como diversas regiões de atração (convergentes), superfícies com derivadas descontínuas, pequena sensibilidade de resposta dos parâmetros na região ótima, dentre outros. Este método se baseia em princípios que combinam abordagens determinísticas e estocásticas, conceitos de *clustering* e de evolução sistemática de complexos de pontos em direção à otimização global, além de fundamentos de evolução competitiva (DUAN; GUPTA; SOROOSHIAN, 1993). O método é descrito em 6 passos, mostrados a seguir (adaptado de DUAN, GUPTA, SOROOSHIAN, 1993).

- 0) Inicialização. Definição dos valores de p (número de complexos), m (número de pontos em cada complexo) e n (número de variáveis independentes no problema de otimização), sendo que $p \geq 1$ e $m \geq n+1$. Cálculo do tamanho da amostra $s=p \times m$;

- 1) Geração da amostra. Seleção aleatória de s pontos $(x_1, \dots, x_s)$ na região viável $\Omega \subset \mathbb{R}^n$. Cálculo do valor da função f_i para cada ponto x_i . Na ausência de informação prévia, utilização de distribuição uniforme de amostragem;
- 2) Ordenação dos pontos. Ordenação dos s pontos em ordem crescente de valor da função. Armazenamento no vetor $D = \{x_i, f_i, i=1, \dots, s\}$, em que $i=1$ representa o ponto com menor valor da função;
- 3) Partição dos complexos. Partição de D em p complexos $A^1, \dots, A^p$, cada um contendo m pontos, de forma que $A^k = \{x_j^k, f_j^k / x_j^k = x_{k+p(j-1)}, f_j^k = f_{k+p(j-1)}, j=1, \dots, m\}$;
- 4) Evolução de cada complexo. Evolução de cada complexo A^k , $k=1, \dots, p$ utilizando o algoritmo de evolução competitiva (CCE);
- 5) Mistura dos complexos. Substituição de $A^1, \dots, A^p$ em D , de forma que $D = \{A^k, k=1, \dots, p\}$. Ordene D em ordem crescente de valor da função;
- 6) Verificação dos critérios de convergência. Caso os critérios sejam aceitos, a otimização é encerrada. Caso contrário, há retomada a partir do Passo 3.

O algoritmo de evolução competitiva CCE, utilizado no método SCE-UA, é descrito a seguir (DUAN; GUPTA; SOROOSHIAN, 1993).

- 0) Inicialização. Seleção de q , a , e b , em que $2 \leq q \leq m$, $a \geq 1$ e $b \geq 1$;
- 1) Atribuição de pesos. Atribuição da distribuição de probabilidade triangular para A^k , i.e., $p_i = 2(m+1-i)/m(m+1)$, $i=1, \dots, m$. O ponto x^k_1 possuirá a maior probabilidade, $p_1 = 2/m+1$. O ponto x^k_m possuirá a menor probabilidade, $p_m = 2/m(m+1)$;
- 2) Seleção das soluções pais. Seleção aleatória de q pontos distintos $u_1, \dots, u_i$ de A^k de acordo com a distribuição de probabilidades especificada acima (os q pontos definirão um subcomplexo). Armazenamento dos pontos no vetor $B = \{u_i, v_i, i=1, \dots, q\}$, em que v_j é o valor da função associado ao ponto u_j . Armazenamento em L das localizações de A^k que serão utilizadas para a construção de B ;
- 3) Geração das soluções filhas. Ordenamento de B em L de forma que os q pontos estejam arranjados em ordem crescente do valor da função. Cálculo do centroide $g = [1/(q-1) \sum_{j=1}^{q-1} u_j]$. Cálculo do novo ponto $r = 2g - uq$;
- 4) Substituição das soluções pais pelas soluções filhas. Substituição de B em A^k usando as localizações originais armazenadas em L . Ordenamento de A^k de forma crescente do valor da função;

- 5) Iteração. Repetição dos passos 1 a 4 b vezes, em que $b \geq 1$ é um parâmetro pré especificado pelo usuário e que determina o número soluções filhas que deverão ser geradas (o quão longe os complexos evoluirão).

Na Figura 4.15 é apresentado o fluxograma simplificado contendo as etapas descritas do método SCE-UA.

Figura 4.15 – Fluxograma do método *Shuffled Complex Evolution*. Fonte: adaptado de Duan, Gupta e Sorooshian, 1993.

4.5 Algoritmos

Com exceção da programação do *datalogger* (desenvolvido em Arduino), todos os algoritmos dos métodos utilizados neste trabalho foram implementados no *software* Matlab (*Release* 2015a) e encontram-se disponíveis no Apêndice A. De forma geral, para cada um dos modelos utilizados (NSRP e OP) foram desenvolvidas funções e *scripts* destinados às seguintes atividades:

- a) atividade 1: preparo das séries observadas de demanda (proveniente dos *dataloggers*) para a utilização na modelagem;
- b) atividade 2: parametrização/calibração dos modelos;
- c) atividade 3: geração das séries sintéticas de demanda;
- d) atividade 4: modificação/correção das séries sintéticas de demanda;

Nas Tabelas 4.9 a 4.12 são listadas e descritas resumidamente as funções criadas para cada uma das atividades mencionadas, relativas aos modelos NSRP e OP.

Tabela 4.9 – Lista das funções desenvolvidas em Matlab para a Atividade 1

Atividade 1	
Modelos: NSRP e OP	
Nome da função	Descrição
horarioverao.mat	Faz a correção das horas dos dias que estavam sob horário de verão
Discret.mat	Transforma os dados recebidos pelos dataloggers em matrizes com intervalo de discretização temporal definido
Verificar.mat	Verifica os dias que possuem intervalos de tempo sem demanda maiores ou iguais ao valor desejado
Del.mat	Remove os dias em que o intervalo de tempo sem demanda foi maior ou igual ao valor desejado
separadia2.mat	Organiza os dados observados em uma matriz, em que cada coluna representa um dia da semana
separahoraPRP.mat	Faz a segmentação dos dias em intervalos de tempo com duração definida. Por exemplo, divisão dos dias em 12 intervalos de 2 horas de duração cada

Tabela 4.10 - Lista das funções desenvolvidas em Matlab para a Atividade 2

Atividade 2	
Modelo: NSRP	
Nome da função	Descrição
estatisticas2.mat	Obtém a média a variância e a covariância (lag 1) dos dias analisados, considerando-se sua subdivisão em intervalos
sceua.mat	Faz a minimização da função objetivo através do algoritmo <i>Shuffled Complex Evolution</i>
Modelo: OP	
parametros.mat	Obtém os parâmetros utilizados no modelo OP a partir dos dados observados

Tabela 4.11 - Lista das funções desenvolvidas em Matlab para a Atividade 3

Atividade 3	
Modelos: OP e NSRP	
Nome da função	Descrição
nsrp.mat	Obtém as séries sintéticas através do modelo NSRP
op.mat	Obtém as séries sintéticas através do modelo OP

Tabela 4.12 - Lista das funções desenvolvidas em Matlab para a Atividade 4

Atividade 4	
Modelos: OP e NSRP	
Nome da função	Descrição
subtracao.mat	Faz a contagem do número diário de intervalos de tempo com demanda na série observada, e faz a subtração diária das demandas através do método de subtração das demandas
gerademanda.mat	Gera uma matriz que contém o número diário de intervalos de tempo que receberão o acréscimo de demanda
iman.mat	Aplica o método de Iman e Conover para a introdução da correlação desejada na matriz alvo
distribuição.mat	Determina quais intervalos de tempo da série sintética receberão o acréscimo de demanda

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Modelo OP

5.1.1 Calibração

A calibração do modelo OP foi realizada a partir da obtenção dos parâmetros n_{ad} , μ_τ , α e μ_q dos dias úteis típicos das séries de demanda de água referentes às Residências 1, 2, 3 e 4. Foi considerado o intervalo de discretização $\Delta t=1$ min para a parametrização do modelo. A extensão total de cada uma das séries observadas utilizadas nesta etapa é descrita no item 4.1.

Definiram-se os dias úteis típicos como:

- a) dias que não sejam sábado e domingo;
- b) dias sem intervalos contínuos de consumo nulo (foram excluídos os dias cujas durações dos intervalos sem consumo resultaram maiores ou iguais a 8h).

Além disso, buscando-se avaliar a metodologia de subtração das demandas (ver item 4.3) para a mitigação dos efeitos negativos da caixa d'água na calibração do modelo OP, cada parâmetro foi estimado considerando-se duas condições:

- a) condição original: manutenção das séries de demanda de água observadas inalteradas;
- b) condição modificada: séries de demanda de água alteradas, conforme metodologia descrita no item 4.3.1.

Na Figura 5.1 são mostrados gráficos com exemplos das séries de demanda de água antes e após o processo de subtração de demanda.

Figura 5.1 – Série de consumo de água da Residência 3 antes (esq.) e após (dir.) o processo de subtração de demanda (dia 17/04/2017)

Ademais, foram excluídos os dias anômalos das séries observadas, que possuíam parâmetro Nad muito superior à média. Acredita-se que nestes dias as séries de demanda observadas foram influenciadas por aparelhos hidrossanitários mantidos indevidamente em funcionamento ou abertos, criando perfil de consumo notoriamente diferenciado, como exemplificado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Exemplos de anomalias identificadas nas séries de consumo de água da Residência 4 durante os dias 16/06/2017 e 11/07/2017

5.1.1.1 Chegada dos blocos de demanda (parâmetros n_{ad} e α_i)

Para considerar a não homogeneidade do processo de chegada dos blocos de demanda de água ao longo do dia, foi realizada a divisão dos dias observados em intervalos contínuos de 2h de duração (divisão do dia em 12 intervalos de igual duração). Para cada intervalo, avaliou-se o número médio de blocos de demanda e determinou-se o coeficiente α_i (Equação 4.13), conforme mostrado nas Tabelas 5.2 a 5.3. Na Tabela 5.1 apresentam-se os valores médios de Nad e seus desvios padrão, calculados para cada uma das condições analisadas. Além disso, para a avaliação da aderência da variável Nad à distribuição normal, foram realizados testes de Kolmogorov-Smirnov para o nível de significância de 0,05, cujos resultados também são mostrados na Tabela 5.1, na qual foram quantificadas as estatísticas de Kolmogorv-Smirnov (Δ) e os valores críticos (Δ_{KS}), acima dos quais a hipótese de distribuição normal é rejeitada.

Tabela 5.1 – Média e desvio padrão da variável Nad das séries de demanda de água observadas nas residências 1 a 4 (Condições original e modificada)

Residência	Original				Modificada			
	μNad	σ	Δ	ΔKS	μNad	σ	Δ	ΔKS
1	130,17	23,72	0,086	0,114	35,62	12,57	0,060	0,114
2	112,32	18,21	0,066	0,111	18,17	5,18	0,108	0,111
3	93,38	15,14	0,060	0,108	32,46	10,13	0,101	0,108
4	55,60	19,85	0,092	0,148	30,95	10,75	0,089	0,148

Tabela 5.2 – Parâmetros μNah e α_i das séries de demanda de água observadas nas residências 1 a 4 (Condição original)

Residência 1												
Hora	00:00 a 01:59	02:00 a 03:59	04:00 a 05:59	06:00 a 07:59	08:00 a 09:59	10:00 a 11:59	12:00 a 13:59	14:00 a 15:59	16:00 a 17:59	18:00 a 19:59	20:00 a 21:59	22:00 a 23:59
μNah	9,94	3,10	1,62	4,44	14,67	18,18	18,04	13,27	10,17	11,16	12,60	12,99
α_i	0,08	0,02	0,01	0,03	0,11	0,14	0,14	0,10	0,08	0,09	0,10	0,10
Residência 2												
Hora	00:00 a 01:59	02:00 a 03:59	04:00 a 05:59	06:00 a 07:59	08:00 a 09:59	10:00 a 11:59	12:00 a 13:59	14:00 a 15:59	16:00 a 17:59	18:00 a 19:59	20:00 a 21:59	22:00 a 23:59
μNah	2,15	0,31	0,90	9,84	8,73	14,66	14,10	10,76	11,75	14,36	13,73	11,04
α_i	0,02	0,00	0,01	0,09	0,08	0,13	0,13	0,10	0,10	0,13	0,12	0,10
Residência 3												
Hora	00:00 a 01:59	02:00 a 03:59	04:00 a 05:59	06:00 a 07:59	08:00 a 09:59	10:00 a 11:59	12:00 a 13:59	14:00 a 15:59	16:00 a 17:59	18:00 a 19:59	20:00 a 21:59	22:00 a 23:59
μNah	2,09	0,73	1,21	13,25	13,78	14,21	10,92	9,22	8,62	8,94	6,70	3,71
α_i	0,02	0,01	0,01	0,14	0,15	0,15	0,12	0,10	0,09	0,10	0,07	0,04
Residência 4												
Hora	00:00 a 01:59	02:00 a 03:59	04:00 a 05:59	06:00 a 07:59	08:00 a 09:59	10:00 a 11:59	12:00 a 13:59	14:00 a 15:59	16:00 a 17:59	18:00 a 19:59	20:00 a 21:59	22:00 a 23:59
μNah	2,08	0,91	1,14	2,88	5,73	8,73	8,82	6,59	5,72	4,40	4,13	4,46
α_i	0,04	0,02	0,02	0,05	0,10	0,16	0,16	0,12	0,10	0,08	0,07	0,08

Tabela 5.3 - Parâmetros μNah e α_i das séries de demanda de água observadas nas residências 1 a 4 (Condição modificada)

Residência 1												
Hora	00:00 a 01:59	02:00 a 03:59	04:00 a 05:59	06:00 a 07:59	08:00 a 09:59	10:00 a 11:59	12:00 a 13:59	14:00 a 15:59	16:00 a 17:59	18:00 a 19:59	20:00 a 21:59	22:00 a 23:59
μNah	0,86	0,03	0,01	0,25	2,97	7,56	7,73	4,32	2,66	3,99	3,62	1,62
α_i	0,02	0,00	0,00	0,01	0,08	0,21	0,22	0,12	0,07	0,11	0,10	0,05
Residência 2												
Hora	00:00 a 01:59	02:00 a 03:59	04:00 a 05:59	06:00 a 07:59	08:00 a 09:59	10:00 a 11:59	12:00 a 13:59	14:00 a 15:59	16:00 a 17:59	18:00 a 19:59	20:00 a 21:59	22:00 a 23:59
μNah	0,07	0,01	1,06	1,39	1,52	1,97	2,35	0,84	1,35	3,66	3,26	0,71
α_i	0,00	0,00	0,06	0,08	0,08	0,11	0,13	0,05	0,07	0,20	0,18	0,04
Residência 3												
Hora	00:00 a 01:59	02:00 a 03:59	04:00 a 05:59	06:00 a 07:59	08:00 a 09:59	10:00 a 11:59	12:00 a 13:59	14:00 a 15:59	16:00 a 17:59	18:00 a 19:59	20:00 a 21:59	22:00 a 23:59
μNah	0,25	0,03	0,50	4,09	7,54	7,08	4,29	1,91	1,96	2,84	1,55	0,41
α_i	0,01	0,00	0,02	0,13	0,23	0,22	0,13	0,06	0,06	0,09	0,05	0,01
Residência 4												
Hora	00:00 a 01:59	02:00 a 03:59	04:00 a 05:59	06:00 a 07:59	08:00 a 09:59	10:00 a 11:59	12:00 a 13:59	14:00 a 15:59	16:00 a 17:59	18:00 a 19:59	20:00 a 21:59	22:00 a 23:59
μNah	0,56	0,13	0,14	1,00	3,04	6,61	6,03	4,78	3,59	2,57	1,91	2,10
α_i	0,02	0,00	0,00	0,03	0,09	0,20	0,19	0,15	0,11	0,08	0,06	0,06

Nas Figuras 5.3 e 5.4 são mostrados gráficos de dispersão dos valores de α_i obtidos para as residências 1 a 4, considerando-se as condições original e modificada das séries de dados analisadas.

Figura 5.3 - Valores de α_i obtidos para as residências 1 a 4 considerando-se as séries de dados originais

Figura 5.4 - Valores de α_i obtidos para as residências 1 a 4 considerando-se as séries de dados modificadas

Na Tabela 5.1 observa-se que as séries nas quais houve maior alteração nos valores médios de Nad após o método de subtração de demanda foram as provenientes do monitoramento das Residências 1, 2 e 3, com reduções de aproximadamente 73%, 83% e 65%,

respectivamente, enquanto que para a Residência 4 observou-se redução de cerca de 44%. Ademais, observa-se nas Figuras 5.3 e 5.4 que após o processo de subtração das demandas houve melhor caracterização dos intervalos com maiores e menores frequências de ocorrência de blocos de demanda, com incremento dos valores de α nos intervalos de pico de consumo e redução nos períodos noturnos, indicando que o modelo poderá reproduzir de forma mais consistente a não homogeneidade do consumo de água nas residências analisadas.

Para avaliar se a distribuição de probabilidades associada a variável aleatória *Nad* pode ser satisfatoriamente aproximada pela distribuição normal, construíram-se gráficos Q-Q Normal (Quantil-Quantil), apresentados nas Figuras 5.5 a 5.8

Figura 5.5 – Gráficos Q-Q Normal da variável *Nad* observada nas séries original e modificada da Residência 1

Figura 5.6 - Gráficos Q-Q Normal da variável *Nad* observada nas séries original e modificada da Residência 2

Figura 5.7 - Gráficos Q-Q Normal da variável *Nad* observada nas séries original e modificada da Residência 3

Figura 5.8 - Gráficos Q-Q Normal da variável *Nad* observada nas séries original e modificada da Residência 4

Nas Figuras 5.5 a 5.8, observa-se que a variável *Nad* apresentou boa aderência à distribuição normal, sendo que apenas poucos valores extremos não foram devidamente representados. De fato, com base nos resultados observados na Tabela 5.1, conclui-se que, para o nível de significância adotado, não se pode rejeitar a hipótese de que os valores de *Nad* das séries originais e modificadas sejam oriundos de distribuição normal. Além disso, nota-se que o método de subtração das demandas reduziu de forma significativa as médias dos valores de *Nad* observados.

5.1.1.2 Duração dos blocos de demanda

No modelo OP, a duração total dos blocos de demanda é definida pela variável aleatória exponencial τ , que possui função de distribuição acumulada - FDA – descrita pela Equação 4.14, cujo parâmetro μ_t representa a duração média dos blocos observados. Na Tabela 5.4

apresentam-se os valores de μ_i relativos às séries observadas das Residências 1 a 4 referentes às condições original e modificada das séries observadas, respectivamente, utilizados na simulação apresentada no item 5.3.1.

Tabela 5.4 – Média e desvio padrão da variável τ das séries de demanda de água observadas nas residências 1 a 4 (Condição 1 e 2)

Residência	Condição 1		Condição 2	
	μ_i	σ	μ_i	σ
1	1,87	2,27	2,81	2,69
2	2,21	4,15	5,40	5,18
3	2,01	2,54	2,82	2,81
4	3,27	3,27	4,22	7,30

Nas Figuras 5.9 a 5.12 apresentam-se os gráficos Q-Q Exponencial (Quantil-Quantil) das durações dos blocos de demanda registrados para as residências 1 a 4 nas Condições 1 e 2.

Figura 5.9 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável τ observada nas séries original e modificada da Residência 1

Figura 5.10 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável τ observada nas séries original e modificada da Residência 2

Figura 5.11 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável τ observada nas séries original e modificada da Residência 3

Figura 5.12 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável τ observada nas séries original e modificada da Residência 4

Na Tabela 5.4 observa-se que após o processo de subtração das demandas houve aumento do valor médio das durações das demandas remanescentes das séries observadas, permitindo melhor aderência dos conjuntos de dados à distribuição exponencial, como representado nas Figuras 5.9 e 5.12. Além disso, nota-se alteração pouco significativa nos

quantis da variável τ da série modificada da Residência 4, com relação à série original, indicando que para este caso a aproximação pela distribuição exponencial resultará em subestimação dos valores mais elevados de duração dos blocos de demanda.

5.1.1.3 Intensidade e persistência de demanda

A intensidade de demanda é definida pela variável aleatória q , que possui distribuição exponencial com parâmetro μ_q (média das intensidades observadas). O fenômeno de persistência de demanda é descrito pelo modelo de Bernoulli, que necessita da avaliação da probabilidade “ $pr0$ ” de ocorrência de valores iguais de intensidade de demanda para dois intervalos de tempo consecutivos ($q_{t-1}=q_t$). Os parâmetros μ_c e $pr0$ estimados para as residências 1 a 4 são descritos na Tabela 5.5. Nas Figuras 5.13 a 5.16 são mostrados os gráficos Q-Q Exponencial das intensidades observadas para as residências 1 a 4.

Tabela 5.5 - Média e desvio padrão da variável q e valor de $pr0$ das séries de demanda de água observadas nas residências 1 a 4 (Condição 1 e 2)

Residência	Condição 1			Condição 2		
	μ_q	σ	$pr0$	μ_q	σ	$pr0$
1	2,67	2,70	0,37	4,05	2,83	0,20
2	2,22	2,02	0,46	3,09	2,13	0,31
3	3,04	3,01	0,30	4,18	3,11	0,19
4	4,75	4,42	0,25	5,21	4,43	0,25

Figura 5.13 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável q observada nas séries original e modificada da Residência 1

Figura 5.14 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável q observada nas séries original e modificada da Residência 2

Figura 5.15 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável q observada nas séries original e modificada da Residência 3

Figura 5.16 - Gráficos Q-Q Exponencial da variável q observada nas séries original e modificada da Residência 4

Nas Figuras 5.13 a 5.16 nota-se que as elevadas frequências de ocorrência dos valores de demanda de água com intensidade igual a 1 L/min permitem que os conjuntos de dados de intensidade das séries originais sejam melhor representados pela distribuição exponencial do que os conjuntos de dados das séries modificadas. Destaca-se que em estudos de modelagem

semelhantes à do presente estudo, foram adotadas diversas distribuições de probabilidade para a melhor representação das intensidades das demandas, como exponencial, Weibull e lognormal (BLOKKER; VREEBURG; DIJK, 2009). Porém, visando avaliar o desempenho do modelo OP como proposto originalmente, manteve-se a utilização da distribuição exponencial para a representação da variável τ .

5.2 Modelo NSRP

5.2.1 Calibração

O modelo NSRP foi calibrado a partir da minimização da função objetivo que relaciona os momentos das séries observadas aos momentos teóricos, conforme Equação 4.19, para a obtenção dos parâmetros λ , η , μ_c , μ_v e β . A parametrização foi feita considerando-se o intervalo de discretização temporal $\Delta t=1$ min, e a extensão total das séries observadas abrangeu os períodos indicados no item 4.1 para cada uma das residências. É importante destacar que foram excluídos da análise os dias que correspondem aos fins de semana e os dias de consumo atípico, nos quais não foram observados consumos de água por períodos iguais ou superiores a 8 horas.

$$Z = \left[p_1 \left(\frac{M}{M'} - 1 \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V'} - 1 \right)^2 + p_3 \left(\frac{C}{C'} - 1 \right)^2 \right] \quad (4.19)$$

em que, p_1 , p_2 e p_3 : pesos atribuídos aos termos da função objetivo; M e M' : média observada e teórica, respectivamente; V e V' : variância observada e teórica, respectivamente; C e C' : covariância (correlação lag-1) observada e teórica, respectivamente.

Buscando-se avaliar a metodologia de subtração das demandas para a mitigação dos efeitos negativos da caixa d'água na calibração do modelo NSRP, cada parâmetro foi estimado considerando-se duas condições:

- a) condição original: manutenção das séries de demanda de água observadas inalteradas;
- b) condição modificada: séries de demanda de água alteradas, conforme metodologia descrita no item 4.3.1.

5.2.1.1 Minimização da função objetivo

O método *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA), utilizado para a minimização da função objetivo, requer o estabelecimento, *a priori*, de intervalos de busca para cada um dos parâmetros utilizados no modelo. Estes intervalos foram definidos com base na literatura e

posteriormente adaptados para a obtenção de melhores resultados. O processo de escolha final dos intervalos de busca dos parâmetros foi feito manualmente, a partir da realização de diversas tentativas, no final das quais avaliava-se os impactos da seleção dos parâmetros nos resultados finais da modelagem. Na Tabela 5.6 são mostrados os intervalos de busca dos parâmetros utilizados por Alvisi, Frachini e Marinelli (2003) e Yamanaka, Tzatchkov e Cortes (2012), além dos adotados neste trabalho.

Tabela 5.6 – Intervalo de busca dos parâmetros λ , η , μc , μx e β utilizados na minimização da função objetivo

Parâmetro	Alvisi (2003)		Yamanaka (2012)		Adotado	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
λ	0,004	0,333	0,0404	1	0,004	1
η	0,1	5	0,007	10	0,1	3
μc	1	100	1	20	1	14
μx	5	5	1	6	0,1	0,9
β	0,07	1	0,05	1	0,01	1,50

Além dos intervalos de busca apresentados na Tabela 5.6, foram definidos os pesos atribuídos a cada um dos termos da função objetivo. A escolha final dos pesos foi realizada após diversas tentativas, e é mostrada a seguir:

- a) $p_1=1$;
- b) $p_2=2$;
- c) $p_3=1$.

O método SCE-UA, da forma como foi implementado e utilizado neste trabalho, requer a definição de parâmetros relacionados ao seu funcionamento (número de complexos, quantidade de pontos por complexo, dentre outros) e aos critérios de parada. Os parâmetros utilizados na otimização são descritos na Tabela 5.7, determinados com base em recomendações de Duan, Gupta e Sorooshian (1993), com adaptações buscando-se a melhor relação entre o tempo computacional empregado e a melhora observada na otimização da função objetivo.

Tabela 5.7 – Parâmetros adotados para a aplicação do método de otimização SCE-UA

Parâmetro	Valor
Número de complexos	80
Número de membros no complexo	100000
Número de evoluções por complexo antes do embaralhamento	100000
Número máximo de avaliações permitidas na otimização	100000
Número máximo de evoluções para atender o critério de convergência	5
Porcentagem de alteração do valor da função objetivo permitidas antes de atingir o critério de convergência	0,0001

Nas Tabelas 5.8 a 5.11 apresentam-se os valores dos momentos calculados a partir das séries observadas nas condições original e modificada e os resultados obtidos após o processo de otimização, para as residências 1 a 4.

Tabela 5.8 – Resultados obtidos pela calibração do modelo NSRP para a Residência 1

Parâmetro/Intervalo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Média (orig.)	0,177	0,028	0,014	0,064	0,465	1,056	0,969	0,639	0,407	0,687	0,622	0,283
Média (mod.)	0,071	0,001	0,000	0,017	0,248	0,714	0,633	0,428	0,259	0,476	0,405	0,130
Variância (orig.)	0,512	0,031	0,014	0,171	2,049	5,329	4,367	3,409	2,055	3,611	2,713	1,099
Variância (mod.)	0,291	0,003	0,000	0,094	1,492	4,166	3,303	2,568	1,487	2,693	1,910	0,750
Covariância (orig.)	0,309	0,003	0,000	0,115	1,528	3,952	3,041	2,436	1,474	2,850	2,074	0,767
Covariância (mod.)	0,196	0,001	0,000	0,078	1,153	3,125	2,326	1,847	1,080	2,136	1,465	0,563
λ (orig.)	0,028	0,622	0,020	0,014	0,033	0,067	0,081	0,042	0,028	0,034	0,047	0,026
λ (mod.)	0,007	0,006	0,004	0,004	0,012	0,037	0,043	0,021	0,015	0,022	0,025	0,008
η (orig.)	1,344	3,000	2,992	0,800	0,573	0,684	0,878	0,704	0,708	0,491	0,691	0,811
η (mod.)	0,945	0,766	2,977	1,185	0,531	0,570	0,753	0,570	0,639	0,491	0,585	0,702
μc (orig.)	12,284	1,004	1,070	8,184	11,045	12,376	13,091	12,943	12,847	11,737	13,775	11,915
μc (mod.)	13,455	1,596	1,302	8,653	13,976	13,941	13,719	13,827	13,015	12,441	12,568	13,604
μx (orig.)	0,686	0,117	0,182	0,454	0,732	0,887	0,807	0,858	0,813	0,839	0,674	0,721
μx (mod.)	0,734	0,100	0,136	0,886	0,812	0,809	0,829	0,860	0,878	0,892	0,761	0,885
β (orig.)	0,898	1,134	0,669	1,273	1,380	1,237	1,286	1,266	1,333	1,380	1,066	1,159
β (mod.)	1,048	0,529	0,279	1,378	1,428	1,416	1,306	1,455	1,393	1,307	1,205	1,334
f (orig.)	0,000	0,357	2,518	0,000	0,001	0,000	0,000	0,004	0,002	0,000	0,001	0,001
f (mod.)	0,002	0,197	1,921	0,401	0,005	0,003	0,002	0,005	0,004	0,002	0,000	0,006

Tabela 5.9 - Resultados obtidos pela calibração do modelo NSRP para a Residência 2

Parâmetro/Intervalo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Média (orig.)	0,025	0,003	0,351	0,426	0,295	0,425	0,549	0,197	0,311	0,955	0,867	0,189
Média (mod.)	0,004	0,000	0,266	0,241	0,156	0,201	0,278	0,063	0,140	0,591	0,531	0,056
Variância (orig.)	0,036	0,003	1,662	1,479	1,145	1,388	1,723	0,464	0,908	3,522	3,175	0,437
Variância (mod.)	0,008	0,000	1,097	0,936	0,756	0,902	1,120	0,240	0,535	2,538	2,248	0,224
Covariância (orig.)	0,016	0,000	1,508	1,227	0,830	1,004	1,434	0,311	0,678	2,998	2,683	0,314
Covariância (mod.)	0,006	0,000	0,974	0,796	0,548	0,680	0,967	0,187	0,420	2,176	1,907	0,199
λ (orig.)	0,071	0,015	0,009	0,035	0,023	0,054	0,054	0,027	0,036	0,062	0,062	0,035
λ (mod.)	0,005	0,004	0,011	0,014	0,011	0,015	0,015	0,005	0,009	0,027	0,026	0,004
η (orig.)	1,405	2,983	0,281	0,416	0,948	0,705	0,363	1,058	0,714	0,330	0,335	0,728
η (mod.)	0,267	2,977	0,360	0,373	0,642	0,664	0,351	0,709	0,653	0,346	0,400	0,451
μc (orig.)	3,322	2,417	12,728	7,840	13,158	7,174	8,859	12,814	11,041	11,594	12,256	6,062
μc (mod.)	1,545	1,302	11,473	10,667	12,983	12,137	8,474	11,510	12,041	8,739	10,550	7,537
μx (orig.)	0,151	0,203	0,827	0,642	0,897	0,782	0,418	0,595	0,555	0,441	0,385	0,643
μx (mod.)	0,126	0,136	0,797	0,588	0,737	0,751	0,746	0,785	0,796	0,856	0,777	0,828
β (orig.)	1,478	0,033	0,378	1,135	0,734	1,188	1,136	0,349	0,571	0,937	1,396	0,484
β (mod.)	1,480	0,279	0,371	0,846	1,425	1,223	1,063	0,695	0,598	0,744	0,622	1,228
f (orig.)	0,000	0,379	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
f (mod.)	0,022	2,408	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,009

Tabela 5.10 - Resultados obtidos pela calibração do modelo NSRP para a Residência 3

Parâmetro/Intervalo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Média (orig.)	0,042	0,008	0,077	0,590	0,951	0,947	0,520	0,340	0,437	0,503	0,250	0,089
Média (mod.)	0,019	0,001	0,054	0,369	0,674	0,677	0,328	0,205	0,308	0,351	0,157	0,047
Variância (orig.)	0,151	0,014	0,460	2,931	5,329	5,793	2,268	1,477	2,729	2,831	1,202	0,403
Variância (mod.)	0,092	0,005	0,331	2,185	4,153	4,606	1,582	1,006	2,080	2,107	0,833	0,273
Covariância (orig.)	0,081	0,004	0,369	2,090	3,347	3,755	1,410	0,988	2,167	2,193	0,909	0,280
Covariância (mod.)	0,049	0,002	0,266	1,572	2,550	2,948	0,934	0,650	1,666	1,634	0,640	0,196
λ (orig.)	0,006	0,006	0,004	0,044	0,072	0,062	0,050	0,030	0,017	0,027	0,017	0,008
λ (mod.)	0,004	0,004	0,004	0,016	0,048	0,029	0,033	0,017	0,010	0,016	0,008	0,004
η (orig.)	1,570	2,775	0,468	0,793	0,861	0,726	1,200	0,969	0,455	0,655	0,705	0,984
η (mod.)	1,456	0,593	0,703	0,529	0,802	0,500	1,059	0,794	0,368	0,529	0,558	0,757
μc (orig.)	11,777	5,025	13,352	13,134	13,165	13,840	13,701	12,224	13,551	13,842	12,104	13,075
μc (mod.)	10,077	2,307	12,561	13,597	13,891	13,728	13,731	13,184	13,640	13,597	13,167	11,857
μx (orig.)	0,891	0,735	0,718	0,847	0,892	0,884	0,897	0,895	0,852	0,888	0,846	0,882
μx (mod.)	0,879	0,107	0,878	0,884	0,866	0,878	0,807	0,760	0,864	0,884	0,823	0,879
β (orig.)	1,384	1,488	1,173	1,307	1,470	1,255	1,396	1,162	1,385	1,312	1,432	1,409
β (mod.)	1,399	0,972	1,488	1,405	1,365	1,407	1,419	1,462	1,390	1,405	1,029	1,192
f (orig.)	0,005	0,044	0,024	0,001	0,018	0,026	0,000	0,001	0,005	0,001	0,000	0,001
f (mod.)	0,123	0,415	0,044	0,007	0,035	0,038	0,010	0,007	0,007	0,002	0,003	0,043

Tabela 5.11 - Resultados obtidos pela calibração do modelo NSRP para a Residência 4

Parâmetro/Intervalo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Média (orig.)	0,070	0,013	0,015	0,098	0,590	2,003	1,150	1,197	0,694	0,512	0,488	0,356
Média (mod.)	0,040	0,004	0,004	0,060	0,473	1,693	0,899	0,971	0,545	0,380	0,361	0,243
Variância (orig.)	0,269	0,033	0,035	0,568	5,757	19,006	8,292	9,181	5,113	3,078	2,772	1,408
Variância (mod.)	0,162	0,016	0,016	0,416	4,819	16,458	6,757	7,502	4,058	2,303	2,031	0,877
Covariância (orig.)	0,181	0,007	0,006	0,326	4,922	17,363	7,099	7,826	4,297	2,650	2,421	1,097
Covariância (mod.)	0,108	0,002	0,002	0,240	4,158	15,087	5,814	6,371	3,402	1,977	1,772	0,658
λ (orig.)	0,007	0,011	0,020	0,009	0,015	0,027	0,021	0,017	0,015	0,017	0,012	0,026
λ (mod.)	0,004	0,004	0,006	0,005	0,006	0,018	0,017	0,023	0,008	0,013	0,011	0,023
η (orig.)	1,024	2,917	2,952	0,938	0,233	0,134	0,197	0,152	0,233	0,354	0,242	0,641
η (mod.)	0,825	2,961	2,984	0,741	0,112	0,109	0,214	0,261	0,156	0,378	0,359	0,581
μc (orig.)	13,645	7,533	9,422	12,667	13,981	13,576	13,009	12,714	13,981	12,552	12,896	12,212
μc (mod.)	12,908	5,747	11,993	13,499	13,011	13,750	13,434	13,602	12,733	13,061	13,058	7,439
μx (orig.)	0,748	0,529	0,264	0,899	0,860	0,868	0,863	0,885	0,860	0,893	0,748	0,710
μx (mod.)	0,621	0,673	0,226	0,827	0,861	0,878	0,891	0,884	0,885	0,894	0,874	0,805
β (orig.)	1,078	1,489	1,499	1,338	1,264	1,399	1,150	1,422	1,264	1,039	1,187	0,758
β (mod.)	1,149	1,454	1,493	1,381	1,022	1,341	1,262	1,483	0,943	0,903	0,834	1,423
f (orig.)	0,000	0,255	0,340	0,057	0,104	0,060	0,007	0,010	0,015	0,001	0,001	0,000
f (mod.)	0,004	0,650	0,702	0,083	0,126	0,056	0,009	0,013	0,013	0,002	0,000	0,000

Observa-se nas Tabelas 5.8 a 5.11 que houve alteração significativa nos momentos das séries originais e modificadas (após método de subtração de demandas), com impacto na determinação dos parâmetros λ , η , μc , μx e β para cada uma das condições analisadas. As influências destes parâmetros na geração das séries sintéticas são discutidas no item 5.3.2.

É importante destacar que a parametrização do modelo NSRP só foi possível após a adoção dos intervalos de busca descritos na Tabela 5.6, que diferem dos intervalos adotados por Alvisi (2003) e Yamanaka (2012) principalmente com relação ao parâmetro μx , que representa a média das intensidades dos blocos unitários que compõem o bloco de demanda. A adoção de intervalos de busca mais amplos para esse parâmetro resultou em séries geradas com intensidades de demanda muito superiores às observadas. As dificuldades encontradas na calibração do modelo se devem, possivelmente, ao efeito do reservatório individual dos domicílios (caixa d'água), que podem alterar os padrões originais das durações e das intensidades das demandas dos aparelhos hidrossanitários registrados nos hidrômetros, como discutido no item 3.4.

5.3 Geração das séries sintéticas

Para a avaliação do desempenho dos modelos NSRP e OP na reprodução das principais estatísticas das séries de dados observadas das Residências 1 a 4, foram geradas séries sintéticas com 100 dias de extensão e discretização temporal de 1 min. Destaca-se que as séries sintéticas foram produzidas a partir dos parâmetros obtidos pela calibração descrita nos itens 5.1 e 5.2, que considerou apenas os dias úteis. Portanto, a avaliação do desempenho dos modelos foi feita desconsiderando-se os dias que correspondem aos fins de semanas das séries observadas.

Nos itens 5.3.1 e 5.3.2 apresentados os resultados das modelagens realizadas com base nos modelos NSRP e OP, e no item 5.3.3 é feita a análise comparativa entre estes modelos.

5.3.1 Modelo OP

O modelo OP foi avaliado considerando-se a sua aplicação a partir da metodologia original e modificada, como descrito a seguir:

- a) OP: modelagem a partir do método original, como proposto por Gargano *et al* (2014);
- b) OP modificado: modelagem considerando-se os métodos de subtração das demandas na etapa de calibração e adição das demandas após a geração das séries sintéticas, como descrito no item 4.3.

5.3.1.1 Reprodução das médias, variâncias e covariâncias

As médias, variâncias e covariâncias das séries observadas e sintéticas (calculadas para cada intervalo de divisão do dia adotado na calibração), geradas para as Residências 1 a 4, são apresentadas na Tabelas 5.12 a 5.14, respectivamente.

Tabela 5.12 - Médias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado

Int.	Médias											
	Residência 1			Residência 2			Residência 3			Residência 4		
	Obs.	OP	OP mod.	Obs.	OP	OP mod.	Obs.	OP	OP mod.	Obs.	OP	OP mod.
1	0,177	0,408	0,199	0,026	0,097	0,038	0,042	0,107	0,049	0,070	0,295	0,091
2	0,028	0,111	0,031	0,003	0,010	0,004	0,008	0,033	0,014	0,013	0,108	0,039
3	0,014	0,059	0,018	0,351	0,045	0,167	0,077	0,065	0,063	0,015	0,151	0,031
4	0,064	0,188	0,068	0,426	0,384	0,360	0,590	0,655	0,604	0,098	0,429	0,222
5	0,465	0,605	0,470	0,295	0,361	0,372	0,951	0,666	0,949	0,590	0,744	0,697
6	1,056	0,732	1,017	0,425	0,613	0,466	0,947	0,722	0,915	2,004	1,148	1,350
7	0,969	0,734	1,055	0,549	0,620	0,581	0,520	0,554	0,567	1,150	1,185	1,242
8	0,639	0,570	0,551	0,197	0,444	0,278	0,341	0,505	0,310	1,197	0,847	1,089
9	0,407	0,403	0,402	0,311	0,503	0,335	0,438	0,419	0,340	0,694	0,705	0,831
10	0,687	0,482	0,586	0,955	0,617	0,821	0,503	0,461	0,407	0,512	0,565	0,523
11	0,622	0,514	0,524	0,867	0,554	0,695	0,250	0,346	0,260	0,488	0,486	0,468
12	0,283	0,532	0,301	0,189	0,478	0,263	0,089	0,188	0,094	0,357	0,572	0,484

Tabela 5.13 – Variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado

Int.	Variâncias											
	Residência 1			Residência 2			Residência 3			Residência 4		
	Obs.	OP	OP mod.	Obs.	OP	OP mod.	Obs.	OP	OP mod.	Obs.	OP	OP mod.
1	0,512	2,216	0,889	0,036	0,460	0,101	0,151	0,689	0,318	0,269	2,835	0,746
2	0,031	0,554	0,031	0,003	0,034	0,017	0,014	0,161	0,057	0,033	0,961	0,229
3	0,014	0,334	0,021	1,662	0,183	1,081	0,460	0,389	0,340	0,035	1,556	0,155
4	0,171	0,969	0,199	1,479	1,513	1,577	2,931	3,660	3,931	0,568	4,080	1,768
5	2,049	2,764	2,743	1,145	1,518	1,655	5,329	3,619	6,030	5,757	6,817	6,434
6	5,329	3,340	6,026	1,388	2,385	1,765	5,793	3,953	6,328	19,006	9,336	11,211
7	4,367	3,453	6,512	1,723	2,661	2,558	2,268	2,983	3,628	8,292	10,102	10,858
8	3,409	2,605	3,170	0,464	1,741	1,018	1,477	2,852	1,923	9,181	7,284	9,503
9	2,055	2,095	2,477	0,908	2,116	1,220	2,729	2,398	2,474	5,113	6,070	8,311
10	3,611	2,397	3,914	3,522	2,453	3,494	2,831	2,731	2,684	3,078	4,980	5,043
11	2,713	2,407	3,090	3,175	2,166	3,240	1,202	1,893	1,505	2,772	4,900	4,133
12	1,099	2,590	1,494	0,437	2,027	0,786	0,403	1,206	0,674	1,408	4,959	4,514

Tabela 5.14 - Covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado

Int.	Covariâncias											
	Residência 1			Residência 2			Residência 3			Residência 4		
	Obs.	OP	OP mod.	Obs.	OP	OP mod.	Obs.	OP	OP mod.	Obs.	OP	OP mod.
1	0,309	0,786	0,360	0,036	0,460	0,101	0,151	0,689	0,318	0,269	2,835	0,746
2	0,003	0,203	0,000	0,003	0,034	0,017	0,014	0,161	0,057	0,033	0,961	0,229
3	0,000	0,132	0,000	1,662	0,183	1,081	0,460	0,389	0,340	0,035	1,556	0,155
4	0,115	0,310	0,057	1,479	1,513	1,577	2,931	3,660	3,931	0,568	4,080	1,768
5	1,528	0,989	1,251	1,145	1,518	1,655	5,329	3,619	6,030	5,757	6,817	6,434
6	3,952	1,155	2,509	1,388	2,385	1,765	5,793	3,953	6,328	19,006	9,336	11,211
7	3,041	1,048	2,596	1,723	2,661	2,558	2,268	2,983	3,628	8,292	10,102	10,858
8	2,436	0,887	1,332	0,464	1,741	1,018	1,477	2,852	1,923	9,181	7,284	9,503
9	1,474	0,711	1,071	0,908	2,116	1,220	2,729	2,398	2,474	5,113	6,070	8,311
10	2,850	0,834	1,585	3,522	2,453	3,494	2,831	2,731	2,684	3,078	4,980	5,043
11	2,074	0,850	1,318	3,175	2,166	3,240	1,202	1,893	1,505	2,772	4,900	4,133
12	0,767	0,940	0,610	0,437	2,027	0,786	0,403	1,206	0,674	1,408	4,959	4,514

Para auxílio na visualização dos dados contidos nas Tabelas 5.12 a 5.14, foram produzidas as Figuras 5.17 a 5.22, que apresentam os valores das médias, variâncias e covariâncias das séries sintéticas das Residências 1 a 4.

Figura 5.17 - Gráficos das médias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.18 - Gráficos das médias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado para as Residências 3 e 4

Figura 5.19 - Gráficos das variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.20 - Gráficos das variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado para as Residências 3 e 4

Figura 5.21 - Gráficos das covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.22 - Gráficos das covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo OP e OP modificado para as Residências 3 e 4

Nas Figuras 5.17 a 5.22 observa-se que, com relação às médias das séries sintéticas das Residências 1 a 3, o modelo OP modificado apresentou performance superior ao modelo original, no qual não foram efetuados os processos de subtração das demandas na etapa de calibração do modelo e adição das demandas após a geração das séries sintéticas, conforme metodologia descrita no item 4.3. Já para a Residência 4, não houve alteração significativa entre das médias calculadas após a modelagem utilizando a metodologia original e a modificada.

Assim como observado para as médias, as variâncias das séries observadas foram melhor reproduzidas através da modelo OP modificado, com exceção da Residência 4, na qual ambos os modelos foram incapazes de reproduzir de forma satisfatória a variação da variância ao longo dos intervalos diários analisados.

Com relação às covariâncias das séries sintéticas, houve melhor representação da variação deste parâmetro ao longo do dia através do modelo OP modificado. Porém, de forma

geral, as séries geradas pelos modelos apresentaram valores de covariância inferiores aos observados.

As pequenas diferenças entre as médias, variâncias e covariâncias relativas às séries geradas pelos modelos OP e OP modificado para a Residência 4 decorrem, provavelmente, do padrão diferenciado do consumo de água, resultante da forma com que esta é abastecida (abastecimento predominantemente direto). Como discutido no item 3.4, o abastecimento mediante reservatório domiciliar pode atenuar as intensidades das demandas de água e aumentar suas durações, principalmente na etapa final de enchimento do reservatório, modificando o padrão de consumo de água como um todo. No caso da Residência 4, como há interferência reduzida do reservatório domiciliar, não há alteração significativa na modelagem antes e após o emprego da técnica de mitigação dos efeitos negativos da caixa d'água (método de adição e subtração das demandas).

5.3.1.2 Reprodução das intensidades e durações das demandas

Além do estudo das médias, variâncias e covariâncias das séries sintéticas, foi avaliada também a eficiência dos modelos em reproduzir as intensidades e as durações das demandas observadas. Na Tabela 5.15 apresentam-se os valores máximos, mínimos, médios e os desvios padrão das intensidades das demandas, calculados para os as séries observadas e para os dias simulados pelos modelos OP e OP modificado.

Tabela 5.15 - Valores máximos, mínimos e médios das intensidades das demandas das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos OP e OP modificado

Parâmetro	Residência 1				Residência 2			
	Máximo (L/min)	Mínimo (L/min)	Média (L/min)	D. Pad. (L/min)	Máximo (L/min)	Mínimo (L/min)	Média (L/min)	D. Pad. (L/min)
Intensidade - Obs.	26	1	2,67	2,70	18	1	2,22	2,02
Intensidade - OP	30	1	3,18	2,64	25	1	2,78	2,24
Intensidade - OP mod.	33	1	2,60	3,20	29	1	2,13	2,36

Parâmetro	Residência 3				Residência 4			
	Máximo (L/min)	Mínimo (L/min)	Média (L/min)	D. Pad. (L/min)	Máximo (L/min)	Mínimo (L/min)	Média (L/min)	D. Pad. (L/min)
Intensidade - Obs.	24	1	3,04	3,01	25	1	4,75	4,42
Intensidade - OP	37	1	3,56	3,04	49	1	5,29	4,78
Intensidade - OP mod.	42	1	2,99	3,54	50	1	4,30	4,87

As distribuições de probabilidade acumuladas das intensidades de demanda das séries observadas e sintéticas das Residências 1 a 4 são mostradas na Figuras 5.23 e 5.24.

Figura 5.23 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de intensidade das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos OP e OP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.24 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de intensidade das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos OP e OP modificado para as Residências 3 e 4

Assim como observado para as médias das séries geradas como um todo (item 5.3.1.1), em geral, houve melhor representação das intensidades das demandas observadas através do emprego do modelo OP modificado. Porém, destaca-se que os valores máximos das intensidades das demandas geradas através da simulação feita com ambos os modelos resultaram superiores às observadas para todas as residências analisadas. Este fato decorre da adoção da distribuição exponencial para a representação das intensidades, que, como discutido no item 5.1.1, tende a produzir séries de consumo que superestimam os valores mais elevados deste parâmetro com relação aos observados através do monitoramento.

Para a avaliação da capacidade de reprodução das durações das demandas simuladas a partir dos modelos OP e OP modificado, construiu-se a Tabela 5.16, que contém os valores máximos, mínimos, médios e os desvios padrão destas, calculados para as séries observadas e sintéticas. As distribuições das probabilidades acumuladas dos valores de duração são apresentadas graficamente nas Figuras 5.25 e 5.26.

Tabela 5.16 - Valores máximos, mínimos e médios das durações das demandas das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos OP e OP modificado

Parâmetro	Residência 1				Residência 2			
	Máximo (min)	Mínimo (min)	Média (min)	D. Pad. (min)	Máximo (min)	Mínimo (min)	Média (min)	D. Pad. (min)
Duração - Obs.	51	1	1,87	2,27	62	1	2,21	4,15
Duração - OP	17	1	2,11	1,57	16	1	2,27	1,72
Duração - OP mod.	23	1	1,59	1,42	24	1	1,59	1,63

Parâmetro	Residência 3				Residência 4			
	Máximo (min)	Mínimo (min)	Média (min)	D. Pad. (min)	Máximo (min)	Mínimo (min)	Média (min)	D. Pad. (min)
Duração - Obs.	63	1	2,01	2,54	131	1	3,27	6,01
Duração - OP	19	1	2,24	1,69	28	1	3,11	2,58
Duração - OP mod.	19	1	1,60	1,46	99	1	2,08	2,64

Figura 5.25 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de duração das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos OP e OP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.26 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de duração das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos OP e OP modificado para as Residências 3 e 4

A partir da Tabela 5.16, nota-se que para as Residências 1 a 3 o modelo OP foram produzidas séries com valores médios de duração das demandas superiores ao da série observada, enquanto que as durações referentes às demandas simuladas pelo OP modificado resultaram inferiores às médias observadas. Ademais, os modelos original e modificado subestimaram os valores máximos das durações, comportamento este previsto na análise da aderência deste parâmetro à distribuição de probabilidades exponencial, como discutido no item 5.1.1.

É importante destacar que, apesar das médias das durações dos blocos de demanda utilizadas como parâmetro de entrada do modelo OP modificado (parâmetro μ_r , calculado na etapa de calibração e apresentado na Tabela 5.4) resultarem significativamente superiores às obtidas na calibração do modelo OP original, as médias das durações obtidas no processo final da modelagem modificada foram atenuadas pela introdução dos valores pontuais de demanda com duração de 1 min, conforme método de adição das demandas (item 4.3.2).

5.3.1.3 Reprodução dos volumes consumidos diários

Os modelos OP e OP modificado foram analisados quanto à capacidade de reproduzir os volumes totais consumidos a cada dia nas Residências 1 a 4, registrados durante o período de monitoramento. Foram calculados os valores máximos, mínimos, médios e o desvio padrão do volume consumido diário, estimados para as séries observadas e geradas pelos modelos OP e OP modificado, como mostrado na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Valores máximos, mínimos e médios dos volumes consumidos diários das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos OP e OP modificado

Parâmetro	Residência 1				Residência 2			
	Máximo (L/d)	Mínimo (L/d)	Média (L/d)	D. Pad. (L/d)	Máximo (L/d)	Mínimo (L/d)	Média (L/d)	D. Pad. (L/d)
Vol. - Obs.	1488	175	649,38	239,12	1175	291	551,19	127,90
Vol. - OP	1078	283	640,52	147,56	845	250	567,34	119,99
Vol. - OP mod.	1094	143	626,80	200,18	959	275	525,47	143,10

Parâmetro	Residência 3				Residência 4			
	Máximo (L/d)	Mínimo (L/d)	Média (L/d)	D. Pad. (L/d)	Máximo (L/d)	Mínimo (L/d)	Média (L/d)	D. Pad. (L/d)
Vol. - Obs.	2037	175	570,61	272,00	3651	154	862,40	796,97
Vol. - OP	944	324	566,69	135,19	2204	187	867,94	367,89
Vol. - OP mod.	1028	176	548,41	194,45	1983	169	848,04	376,95

As distribuições de probabilidade acumuladas dos volumes consumidos diários das Residências 1 a 4 (séries observadas e geradas pelos modelos OP e OP modificado) são apresentados nas Figuras 5.27 e 5.28.

Figura 5.27 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de volume consumido diário das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos OP e OP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.28 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de volume consumido diário das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos OP e OP modificado para as Residências 3 e 4

Na Tabela 5.17 observa-se que as médias dos volumes consumidos diários das séries de dados produzidas pelo modelo OP resultaram mais próximas às médias relativas às séries observadas, quando comparadas às séries geradas pelo modelo OP modificado. Porém, como indicado nas Figuras 5.27 e 5.28, as frequências de ocorrências dos valores de consumo diário de água são mais efetivamente representadas pelo modelo OP modificado, com exceção da Residência 4, na qual não foram observadas alterações significativas nas frequências acumuladas do parâmetro em questão.

5.3.2 Modelo NSRP

Assim como feito para o modelo OP, o modelo NSRP foi avaliado considerando-se a sua aplicação a partir da metodologia original e modificada, como descrito a seguir

- NSRP: modelagem a partir do método original, como proposto por Alvisi, Franchini e Marinelli (2013);
- NSRP modificado: modelagem considerando-se os métodos de subtração das demandas na etapa de calibração e adição das demandas após a geração das séries sintéticas, como descrito no item 4.3.2.

Destaca-se que a avaliação da performance do modelo NSRP foi feita a partir da análise das estatísticas das séries sintéticas geradas, que possuem extensão de 100 dias cada.

5.3.2.1 Reprodução das médias, variâncias e covariâncias

Foram calculadas as médias, variâncias e covariâncias das séries sintéticas geradas para os 12 intervalos de divisão do dia, definidos na etapa de calibração. Os resultados obtidos para as Residências 1 a 4 são apresentados nas Tabelas 5.18 a 5.20.

Tabela 5.18 – Médias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado

Médias (L/min)												
Int.	Residência 1			Residência 2			Residência 3			Residência 4		
	Obs.	NSRP	NSRP mod.	Obs.	NSRP	NSRP mod.	Obs.	NSRP	NSRP mod.	Obs.	NSRP	NSRP mod.
1	0,177	0,206	0,126	0,026	0,030	0,030	0,042	0,023	0,043	0,070	0,036	0,049
2	0,028	0,043	0,030	0,003	0,002	0,002	0,008	0,005	0,009	0,013	0,012	0,014
3	0,014	0,002	0,014	0,351	0,175	0,230	0,077	0,028	0,039	0,015	0,021	0,018
4	0,064	0,056	0,058	0,426	0,402	0,361	0,590	0,665	0,452	0,098	0,085	0,065
5	0,465	0,449	0,377	0,295	0,286	0,266	0,951	1,114	1,115	0,590	0,515	0,391
6	1,056	1,180	1,112	0,425	0,525	0,421	0,947	1,211	0,928	2,004	1,725	1,405
7	0,969	1,254	1,039	0,549	0,516	0,391	0,520	0,595	0,574	1,150	0,932	0,978
8	0,639	0,696	0,597	0,197	0,227	0,188	0,341	0,365	0,327	1,197	0,734	1,082
9	0,407	0,424	0,388	0,311	0,312	0,269	0,438	0,346	0,351	0,694	0,437	0,454
10	0,687	0,631	0,666	0,955	0,953	0,859	0,503	0,485	0,470	0,512	0,406	0,355
11	0,622	0,665	0,634	0,867	0,788	0,759	0,250	0,235	0,174	0,488	0,275	0,303
12	0,283	0,280	0,271	0,189	0,188	0,149	0,089	0,068	0,076	0,357	0,313	0,368

Tabela 5.19 - Variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado

Variâncias												
Int.	Residência 1			Residência 2			Residência 3			Residência 4		
	Obs.	NSRP	NSRP mod.	Obs.	NSRP	NSRP mod.	Obs.	NSRP	NSRP mod.	Obs.	NSRP	NSRP mod.
1	0,512	0,639	0,243	0,036	0,029	0,030	0,151	0,082	0,144	0,269	0,165	0,137
2	0,031	0,041	0,030	0,003	0,002	0,002	0,014	0,007	0,009	0,033	0,017	0,023
3	0,014	0,002	0,013	1,662	0,875	0,944	0,460	0,154	0,163	0,035	0,025	0,025
4	0,171	0,116	0,104	1,479	1,236	1,021	2,931	3,668	2,356	0,568	0,465	0,217
5	2,049	2,143	1,548	1,145	1,334	0,941	5,329	6,545	5,707	5,757	3,851	2,375
6	5,329	6,669	5,781	1,388	1,757	1,347	5,793	7,808	5,406	19,006	13,167	9,945
7	4,367	6,510	4,994	1,723	1,231	0,998	2,268	3,246	2,546	8,292	6,665	6,778
8	3,409	3,942	3,165	0,464	0,565	0,343	1,477	1,943	1,505	9,181	5,389	7,492
9	2,055	2,348	1,884	0,908	0,791	0,687	2,729	2,370	1,907	5,113	2,749	2,981
10	3,611	3,438	3,621	3,522	2,804	3,407	2,831	3,140	2,671	3,078	2,625	2,183
11	2,713	3,019	2,882	3,175	2,273	2,715	1,202	1,291	0,726	2,772	1,559	1,828
12	1,099	1,167	1,036	0,437	0,416	0,195	0,403	0,376	0,370	1,408	1,246	1,463

Tabela 5.20 - Covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado

Int.	Covariâncias											
	Residência 1			Residência 2			Residência 3			Residência 4		
	Obs.	NSRP	NSRP mod.	Obs.	NSRP	NSRP mod.	Obs.	NSRP	NSRP mod.	Obs.	NSRP	NSRP mod.
1	0,309	0,465	0,128	0,016	0,002	0,000	0,081	0,057	0,099	0,181	0,127	0,093
2	0,003	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,003	0,000	0,007	0,008	0,008
3	0,000	0,000	0,000	1,508	0,800	0,811	0,369	0,128	0,124	0,006	0,009	0,006
4	0,115	0,083	0,046	1,227	1,037	0,795	2,090	2,981	1,930	0,326	0,370	0,155
5	1,528	1,763	1,218	0,830	1,057	0,707	3,347	5,204	4,600	4,922	3,546	2,193
6	3,952	5,543	4,793	1,004	1,388	0,993	3,755	6,482	4,584	17,363	12,359	9,318
7	3,041	5,259	4,036	1,434	1,015	0,729	1,410	2,533	1,974	7,099	6,153	6,170
8	2,436	3,216	2,609	0,311	0,428	0,187	0,988	1,541	1,178	7,826	5,004	6,731
9	1,474	1,925	1,498	0,678	0,624	0,484	2,167	2,040	1,620	4,297	2,491	2,762
10	2,850	2,924	3,050	2,998	2,434	2,900	2,193	2,607	2,208	2,650	2,339	1,919
11	2,074	2,509	2,344	2,683	1,953	2,250	0,909	1,053	0,558	2,421	1,405	1,606
12	0,767	0,941	0,771	0,314	0,310	0,068	0,280	0,300	0,275	1,097	1,040	1,176

Nas Figuras 5.29 a 5.34 apresentam-se gráficos de dispersão dos valores contidos nas Tabelas 5.18 a 5.20.

Figura 5.29 – Gráficos das médias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.30 - Gráficos das médias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado para as Residências 3 e 4

Figura 5.31 - Gráficos das variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.32 - Gráficos das variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado para as Residências 3 e 4

Figura 5.33 - Gráficos das covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.34 - Gráficos das covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelo modelo NSRP e NSRP modificado para as Residências 3 e 4

Nas Figuras 5.29 a 5.34 observa-se que o modelo NSRP modificado apresentou o melhor desempenho na reprodução das médias, variâncias e covariâncias observadas das Residência 1, enquanto que a performance foi similar para as demais residências.

As séries sintéticas geradas por ambos os modelos para a Residência 4 resultaram em médias, variâncias e covariâncias inferiores às obtidas pela série observada. Assim como discutido para o modelo OP (item 5.3.1), as performances similares dos modelos NSRP e NSRP modificado na reprodução dos momentos da série observada referente à Residência 4 são atribuídas ao padrão temporal de consumo de água resultante do abastecimento predominantemente indireto, no qual a maior parte dos aparelhos hidrossanitários do domicílio não são abastecidos pela caixa d'água.

5.3.2.2 Reprodução das intensidades e durações das demandas

A avaliação dos modelos NSRP e NSRP modificado também foi feita a partir da análise da capacidade destes em reproduzir as intensidades e durações das demandas observadas. Na Tabela 5.21 são mostrados os valores máximos, mínimos, médios e os desvios padrão das intensidades das demandas, calculados para as Residências 1 a 4.

Tabela 5.21 – Valores máximos, mínimos e médios das intensidades das demandas das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP e NSRP modificado

Parâmetro	Residência 1				Residência 2			
	Máximo (L/min)	Mínimo (L/min)	Média (L/min)	D. Pad. (L/min)	Máximo (L/min)	Mínimo (L/min)	Média (L/min)	D.Pad. (L/min)
Intensidade - Obs.	26	1	2,67	2,70	18	1	2,22	2,02
Intensidade - NSRP	26	1	3,68	2,87	16	1	2,40	1,69
Intensidade - NSRP mod.	23	1	2,59	2,74	18	1	1,94	1,87

Parâmetro	Residência 3				Residência 4			
	Máximo (L/min)	Mínimo (L/min)	Média (L/min)	D. Pad. (L/min)	Máximo (L/min)	Mínimo (L/min)	Média (L/min)	D. Pad. (L/min)
Intensidade - Obs.	24	1	3,04	3,01	25	1	4,75	4,42
Intensidade - NSRP	30	1	4,26	3,26	32	1	4,63	3,86
Intensidade - NSRP mod.	29	1	2,92	2,92	37	1	3,74	3,67

Nas Figuras 5.35 e 5.36 apresentam-se as frequências acumuladas das intensidades das demandas das residências 1 a 4, comparadas com as estimadas pelas séries sintéticas obtidas pelos modelos NSRP e NSRP modificado.

Figura 5.35 – Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de intensidade das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP e NSRP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.36 – Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de intensidade das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP e NSRP modificado para as Residências 3 e 4

Com exceção da Residência 4, as amplitudes de variação dos valores de intensidade das demandas foram bem representadas pelos modelos NSRP e NSRP modificado. Apesar das médias das intensidades calculadas por ambos os modelos resultarem próximas das observadas, as frequências acumuladas de ocorrência das intensidades simuladas pelo modelo NSRP apresentaram padrão distinto do observado, principalmente para valores inferiores a 5 L/min, que apresentaram frequências aquém das desejadas.

Assim como feito para as intensidades das demandas, foram avaliadas as suas durações, como indicado na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 - Valores máximos, mínimos e médios das durações das demandas das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP e NSRP modificado

Parâmetro	Residência 1				Residência 2			
	Máximo (min)	Mínimo (min)	Média (min)	D. Pad. (min)	Máximo (min)	Mínimo (min)	Média (min)	D. Pad. (min)
Duração - Obs.	51	1	1,87	2,27	62	1	2,21	4,15
Duração - NSRP	33	1	4,90	3,62	35	1	4,74	4,63
Duração - NSRP mod.	28	1	1,79	2,12	35	1	1,64	2,03

Parâmetro	Residência 3				Residência 4			
	Máximo (min)	Mínimo (min)	Média (min)	D. Pad. (min)	Máximo (min)	Mínimo (min)	Média (min)	D. Pad. (min)
Duração - Obs.	63	1	2,01	2,54	131	1	3,27	6,01
Duração - NSRP	22	1	5,42	3,13	73	1	7,54	8,67
Duração - NSRP mod.	26	1	1,86	2,25	60	1	2,46	4,78

Nas Figuras 5.37 e 5.38 mostram-se as distribuições acumuladas das probabilidades das durações das demandas, observadas e simuladas pelos modelos NSRP e NSRP modificado, relativas as Residências 1 a 4.

Figura 5.37 – Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de duração das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP e NSRP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.38 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de duração das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP e NSRP modificado para as Residências 3 e 4

Diferentemente do observado para os momentos e intensidades das séries sintéticas, nas quais os modelos NSRP e NSRP modificado apresentaram desempenho semelhante na representação da série observada, houve significativa melhora na representação das durações das demandas através da utilização da versão modificada do modelo NSRP. Nas Tabelas 5.8 a 5.11, que apresentam os resultados da calibração do modelo NSRP original, é possível observar que a tentativa de reprodução das demandas com curta duração e baixa intensidade (que predominam no período noturno) é feita através da seleção de valores elevados para os parâmetros λ (número médio de blocos de demanda por unidade de tempo) e η (η^{-1} representa a duração média de cada DE) e reduzidos para μc (número médio de demandas elementares por bloco), que levam à geração de grandes quantidades de blocos formados por poucas demandas elementares com curta duração, porém incapazes de representar o consumo observado.

5.3.2.3 Reprodução dos volumes consumidos diários

A performance dos modelos NSRP e NSRP modificado em reproduzir efetivamente os volumes consumidos diários observados para as Residências 1 a 4 foi avaliada. Na Tabela 5.23 apresentam-se os valores máximos, mínimos, médios e os desvios padrão dos volumes consumidos diários observados e simulados, enquanto que nas Figuras 5.39 e 5.40 são mostradas as suas distribuições de probabilidade acumulada.

Tabela 5.23 - Valores máximos, mínimos e médios dos volumes consumidos diários das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP e NSRP modificado

Parâmetro	Residência 1				Residência 2			
	Máximo (L/d)	Mínimo (L/d)	Média (L/d)	D. Pad. (L/d)	Máximo (L/d)	Mínimo (L/d)	Média (L/d)	D. Pad. (L/d)
Vol. - Obs.	1488	175	649,38	239,12	1175	291	551,19	127,90
Vol. - NSRP	1000	420	706,35	128,96	783	349	528,56	94,02
Vol. - NSRP mod.	951	393	637,39	133,63	666	227	470,89	90,73

Parâmetro	Residência 3				Residência 4			
	Máximo (L/d)	Mínimo (L/d)	Média (L/d)	D. Pad. (L/d)	Máximo (L/d)	Mínimo (L/d)	Média (L/d)	D. Pad. (L/d)
Vol. - Obs.	2037	175	570,61	272,00	3651	154	862,40	796,97
Vol. - NSRP	953	360	616,80	122,74	1254	237	658,73	223,41
Vol. - NSRP mod.	923	257	546,93	146,18	1404	169	657,83	252,38

Figura 5.39 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de volume consumido diário das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP e NSRP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.40 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de volume consumido diário das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP e NSRP modificado para as Residências 3 e 4

Nas Figuras 5.39 e 5.40 observa-se que as frequências acumuladas dos valores observados de volume consumido diário foram melhores representadas pelo modelo NSRP modificado nas modelagens efetuadas para as Residências 1 e 3. Enquanto que para a Residência 4 a performance de ambos os modelos foi similar, a Residência 2 foi melhor representada pelo modelo original. Além disso, o modelo em suas versões original e modificada não simulou adequadamente dias com consumos extremos (nos quais houveram grandes ou pequenos volumes consumidos).

5.3.3 Modelo OP modificado vs NSRP modificado

Nos itens 5.3.1 e 5.3.2 foram apresentados os resultados dos modelos OP e NSRP, sob suas versões originais e modificadas, e efetuadas análises quanto às suas capacidades de reproduzir o comportamento observado do consumo de água das Residências 1 a 4. Verificou-se que, de forma geral, as modificações propostas proporcionaram melhores ajustes dos modelos aos dados observados, principalmente para as Residências 1 a 3, que possuem abastecimento predominantemente indireto. Dessa forma, foram selecionadas as versões modificadas de ambos os modelos para a comparação direta descrita nos subitens a seguir.

5.3.3.1 Reprodução das médias, variâncias e covariâncias

As médias, variâncias e covariâncias das séries sintéticas geradas pelos modelos OP modificado e NSRP modificado são apresentadas nas Figuras 5.41 a 5.46. Destaca-se que os

valores que serviram de subsídio para a elaboração destes gráficos são descritos nas Tabelas 5.12 a 5.14 e 5.18 a 5.20.

Figura 5.41 - Gráficos das médias das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.42 - Gráficos das médias das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 3 e 4

Figura 5.43 - Gráficos das variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.44 - Gráficos das variâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 3 e 4

Figura 5.45 - Gráficos das covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.46 - Gráficos das covariâncias das séries observadas e sintéticas geradas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 3 e 4

Nas Figuras 5.41 a 5.44 observa-se que os modelos OP e NSRP modificados foram capazes de representar satisfatoriamente as médias e variâncias das Residências 1 a 3. Porém,

houve melhor desempenho na representação das covariâncias através do modelo NSRP modificado.

Com relação a Residência 4, nota-se que não foi possível modelar adequadamente os momentos da série observada, mesmo fazendo-se uso de modelos com premissas de funcionamento notoriamente distintas. Essa incapacidade de reprodução pode estar relacionada com a forma mista com que esta residência é abastecida (predominantemente indireta, porém com determinados aparelhos hidrossanitários abastecidos por reservatório domiciliar) ou com a definição dos dias que foram adotados para a calibração dos modelos (as calibrações foram feitas excluindo-se apenas os fins de semana dentre os dias monitorados, considerando que todos os dias poderiam ser representados por variações do mesmo processo estocástico).

5.3.3.2 Reprodução das intensidades e durações das demandas

Os gráficos das distribuições de probabilidade acumulada das intensidades e durações das demandas produzidas a partir dos modelos OP e NSRP modificados são apresentadas nas Figuras 5.47 a 5.50.

Figura 5.47 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de intensidade das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.48 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de intensidade das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 3 e 4

Figura 5.49 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de duração das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.50 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de duração das demandas das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 3 e 4

As principais diferenças nas formas com que os modelos OP e NSRP simulam o comportamento do consumo de água ao longo do tempo residem nas abordagens adotadas para a criação dos blocos de demanda. Para o modelo OP, as durações e intensidades de cada bloco são definidas diretamente pelos parâmetros μ_τ e μ_q , enquanto que no modelo NSRP estas resultam do processo de agrupamento de blocos de demanda elementar, os quais possuem duração e intensidade determinados pelos parâmetros η e μ_x . Porém, para ambos os casos, adotam-se distribuições exponenciais para a representação destes parâmetros. Dessa forma, o comportamento similar observado para as durações e intensidades simuladas (conforme Figuras 5.47 a 5.50 e Tabelas 5.15, 5.16, 5.21 e 5.22) é atribuído ao tipo de distribuição adotada, sendo

que os dois modelos foram incapazes de representar os valores mais elevados de duração observados.

5.3.3.3 Reprodução dos volumes consumidos diários

Nas Figuras 5.51 a 5.52 apresentam-se os gráficos de distribuição de frequências acumuladas dos volumes consumidos diários das séries observadas e produzidas pelos modelos OP e NSRP modificados.

Figura 5.51 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de volume consumido diário das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 1 e 2

Figura 5.52 - Gráficos da função de distribuição acumulada dos valores de volume consumido diário das séries observadas e sintéticas obtidas pelos modelos NSRP modificado e OP modificado para as Residências 3 e 4

Nas Figuras 5.51 e 5.52 observa-se que, com exceção da Residência 4, as frequências acumuladas dos valores de volumes consumidos diários foram melhores representados pelo modelo OP modificado. A comparação entre as estatísticas das séries observadas e modeladas mostra que (Tabelas 5.17 e 5.23), enquanto as médias dos volumes consumidos diários

resultaram similares ao se utilizar os modelos NSRP modificado e OP modificado, o último proporcionou a geração de séries sintéticas com maior amplitude de variação deste parâmetro e melhor representação dos desvios padrão.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os modelos OP e NSRP foram utilizados para a modelagem da demanda de água de usuários residenciais individuais. Para tanto, foram selecionadas quatro residências com perfis de abastecimento distintos (Residências 1 a 3 com abastecimento predominantemente indireto, intermediado por reservatório domiciliar, e Residência 4 com abastecimento predominantemente direto através do ramal predial) para a calibração e avaliação da performance dos modelos, sendo o monitoramento realizado através de hidrômetros, sensores e *dataloggers*.

Os *dataloggers* desenvolvidos apresentaram bom desempenho e confiabilidade ao longo de todo o período de monitoramento. As principais premissas consideradas no seu desenvolvimento foram a maximização da autonomia de funcionamento, redução do custo de aquisição e montagem dos equipamentos, facilidade na programação do código e na exportação dos dados. Para tanto, a utilização da plataforma de *hardware* e *software* *Arduíno* apresentou boa alternativa, sendo que, aliado às demais peças de *hardware*, foi possível obter a autonomia de funcionamento ininterrupto de 2 a 3 semanas (estendida por todo o período experimental através da utilização de baterias recarregáveis sobressalentes) e custo final da ordem de 10 vezes inferior ao observado em equipamentos comercializados para o mesmo fim.

Dos dados gerados no monitoramento, foram excluídos os dias relativos aos fins de semana e os dias nos quais houve consumo de água atípico. Além disso, buscando-se mitigar os efeitos negativos relacionados à influência da caixa d'água no perfil temporal do consumo de água das residências, os dados gerados no monitoramento foram submetidos ao processo de subtração das demandas com valor de intensidade de 1 L/min e duração de 1 min. Nesse contexto, destacam-se as principais conclusões relacionadas à etapa de calibração do modelo OP:

- a) apesar da redução dos valores médios da variável *Nad* antes e após as séries de dados serem submetidas ao processo de subtração das demandas, a variável permaneceu sendo bem representada pela distribuição normal em todos os casos;
- b) houve alteração significativa na frequência de ocorrência dos valores observados da variável τ , que representa a duração média das demandas, após o processo de remoção das demandas viabilizando a utilização da distribuição exponencial para a sua representação;
- c) observou-se que, após o processo de subtração das demandas, as intensidades resultantes não foram bem representadas pelo modelo exponencial de distribuição,

indicando que sua adoção resultará em superestimação dos valores mais elevados de intensidade, com relação aos observados.

Da etapa de calibração do modelo NSRP, conclui-se que:

- a) a simulação do consumo de água das residências através do modelo NSRP é feita através do processo de criação de blocos de demanda. Estes são resultantes da ocorrência e interação de constituintes elementares (demanda elementar – DE), para os quais são estabelecidas diversas hipóteses, como as distribuições de probabilidade das suas intensidades e durações. Dessa forma, diferentemente do realizado para o método OP, torna-se inviável a verificação da validade destas hipóteses através do aparato experimental utilizado;
- b) a utilização do método SCE-UA para a otimização da função que relaciona os momentos observados aos teóricos exige o estabelecimento de limites inferior e superior para os parâmetros utilizados na equação. Para tanto, foram utilizados valores referência, extraídos de estudos semelhantes. Porém, foi necessário reduzir o limite máximo de variação do parâmetro μx para evitar a ocorrência de valores elevados de intensidade de demanda na simulação, incompatíveis com os observados.

Das etapas de geração das séries sintéticas através dos modelos OP e NSRP, conclui-se que:

- a) as médias, variâncias e covariâncias das séries sintéticas produzidas pelo modelo OP modificado resultaram mais próximas às observadas, com relação ao modelo OP original. Com relação ao modelo NSRP, houve desempenho similar na reprodução dessas estatísticas através dos modelos original e modificado;
- b) os modelos OP modificado e NSRP modificado apresentaram desempenho similar na reprodução das médias e variâncias das séries observadas. O modelo NSRP modificado produziu, de forma geral, séries com maiores valores de covariância do que as resultantes do monitoramento. Já as covariâncias das séries produzidas pelo modelo OP modificado resultaram, de forma geral, inferiores às observadas;
- c) de forma geral, as versões originais dos modelos OP e NSRP foram incapazes de reproduzir satisfatoriamente as intensidades e as durações das demandas observadas;
- d) para a Residência 4, observou-se pouca alteração nos valores das estatísticas das séries geradas pelos modelos NSRP e OP, comparados às suas versões modificadas, indicando

que os efeitos prejudiciais aos modelos, relacionados à elevada frequência de ocorrência de demandas com valores de intensidade e duração iguais a 1 L/min e 1 min, podem ser atribuídos à forma com que as residências 1 a 3 são abastecidas (abastecimento predominantemente indireto);

- e) o modelo OP modificado apresentou desempenho superior ao NSRP modificado na representação dos volumes consumidos diários, com exceção da Residência 4;

Para estudos futuros, recomenda-se o monitoramento da demanda de água residencial acompanhado da caracterização dos componentes elementares que o produzem (utilização dos aparelhos hidrossanitários), permitindo a avaliação completa dos efeitos da utilização dos reservatórios domiciliares no padrão de consumo de água e seus impactos nos modelos NSRP e OP.

REFERÊNCIAS

- ALVISI, S.; ANSALONI, N.; FRANCHINI, M. A procedure for spatial aggregation of synthetic water demand time series. **Procedia Engineering**, v. 70, p. 51-60, 2014.
- ALVISI, S.; ANSALONI, N.; FRANCHINI, M. Generation of synthetic water demand time series at different temporal and spatial aggregation levels. **Urban Water Journal**, v. 11, n. 4, p. 297-310, 2014.
- ALVISI, S.; ANSALONI, N.; FRANCHINI, M.. Five variants of a procedure for spatial aggregation of synthetic water demand time series. **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, v. 64, n. 5, p. 629-639, 2015.
- ALVISI, S.; FRANCHINI, M.; MARINELLI, A. A stochastic model for representing drinking water demand at residential level. **Water Resources Management**, v. 17, n. 3, p. 197-222, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15538 - Medidores de água potável - Ensaio para avaliação de eficiência**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626 - Instalação predial de água fria**. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8193 - Hidrômetro taquimétrico para água fria até 15,0 m³/h de vazão nominal**. Rio de Janeiro, 1997.
- AZEVEDO NETO, J. M. *et al.* **Manual de Hidráulica**. 8ª edição, E. Edgard Blücher: São Paulo, 1998.
- BLOKKER, E. J. M. Modeling water demand patterns; description and evaluation of simulation model SIMDEUM. **Kiwa NV, Nieuwegein, The Netherlands**, 2006.
- BLOKKER, E. J. M.. Stochastic water demand modelling for a better understanding of hydraulics in water distribution networks. **Water Management Academic Press**, 2010.
- BLOKKER, E. J. M.; VREEBURG, J. H. G.; VAN DIJK, J. C. Simulating residential water demand with a stochastic end-use model. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, n. 1, p. 19-26, 2009.
- BUCHBERGER, S. G.; WELLS, G. J. Intensity, duration, and frequency of residential water demands. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 122, n. 1, p. 11-19, 1996.
- BUCHBERGER, S. G.; WU, L. Model for instantaneous residential water demands. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 121, n. 3, p. 232-246, 1995.
- BUSSAB, W.; MORETTIN, P. Estatística Básica, **Editora Saraiva**. São Paulo, 2013.
- COBACHO, R.; ARREGUI, F.; CABRERA, E. Private water storage tanks: evaluating their inefficiencies. **Water Practice and Technology**, v. 3, n. 1, p. wpt2008025, 2008.
- COWPERTWAIT, P. S. P. *et al.* Stochastic point process modelling of rainfall. I. Single-site fitting and validation. **Journal of Hydrology**, v. 175, n. 1-4, p. 17-46, 1996.

CREACO, E. *et al.* Considering the mutual dependence of pulse duration and intensity in models for generating residential water demand. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 11, p. 04015031, 2015.

CREACO, E. *et al.* Correlation or not correlation? This is the question in modeling residential water demand pulses. **Procedia Engineering**, v. 119, p. 1455-1462, 2015.

CREACO, E. *et al.* Parameterizing residential water demand pulse models through smart meter readings. **Environmental Modelling & Software**, v. 80, p. 33-40, 2016.

CREACO, E. *et al.* Preserving duration-intensity correlation on synthetically generated water demand pulses. 2015. **Procedia Engineering**, v. 119, p. 1463-1472, 2015.

CREACO, E.; BLOKKER, M.; BUCHBERGER, S. Models for generating household water demand pulses: Literature review and comparison. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 6, p. 04017013, 2017.

CRIMINISI, A.; FONTANAZZA, C. M.; FRENI, G.; LA LOGGIA, G. Evaluation of the apparent losses caused by water meter under-registration in intermittent water supply. **Water Science and Technology**, v. 60, n. 9, p. 2373-2382, 2009.

CUBILLO, F. Droughts, risk management and reliability. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 4, n. 3, p. 1-12, 2004.

DA SILVA, N. R. **Estudo de Metodologias para Avaliação de Submedição de Hidrômetros Domiciliares em Sistemas de Água**. 2008. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA.

DI PALMA, F. *et al.* The overall pulse model for water demand of aggregated residential users. **Procedia Engineering**, v. 186, p. 483-490, 2017.

DI PALMA, F. *et al.* The overall pulse model to predict the end user water demand. **Procedia Engineering**, v. 89, p. 942-949, 2014.

DUAN, Q. Y.; GUPTA, Vijai K.; SOROOSHIAN, Soroosh. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. **Journal of optimization theory and applications**, v. 76, n. 3, p. 501-521, 1993.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water resources research**, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992.

ENTEKHABI, D.; RODRIGUEZ, I.; EAGLESON, P. S. Probabilistic representation of the temporal rainfall process by a modified Neyman-Scott rectangular pulses model: Parameter estimation and validation. **Water Resources Research**, v. 25, n. 2, p. 295-302, 1989.

GALVÃO, J. R. B. **Avaliação da relação pressão x consumo, em áreas controladas por válvulas redutoras de pressão (VRPs). Estudo de caso: rede de distribuição de água da Região Metropolitana de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

GARCIA, V. J. *et al.* Stochastic model to evaluate residential water demands. **Journal of water resources planning and management**, v. 130, n. 5, p. 386-394, 2004.

GARGANO, R. *et al.* A stochastic approach for the water demand of residential end users. **Urban Water Journal**, v. 13, n. 6, p. 569-582, 2016.

GARGANO, R. *et al.* A stochastic model for daily residential water demand. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 16, n. 6, p. 1753-1767, 2016

GARGANO, R. *et al.* The mixed model for the residential flow demand of a small number of users. **Procedia Engineering**, v. 89, p. 975-981, 2014.

GUERCIO, R.; MAGINI, R.; PALLAVICINI, I. Instantaneous residential water demand as stochastic point process. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 48, 2001.

IMAN, R. L.; CONOVER, W. A distribution-free approach to inducing rank correlation among input variables. **Communications in Statistics-Simulation and Computation**, v. 11, n. 3, p. 311-334, 1982.

INMETRO. **Portaria nº 436, de 10 de dezembro 2007.**

KRUGER, E. **Water Quality Deterioration in Potable Water Reservoirs Relative to Chlorine Decay.** Water Research Commission. Pretoria, 2001.

MAGINI, R.; PALLAVICINI, I.; GUERCIO, R. Spatial and temporal scaling properties of water demand. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 134, n. 3, p. 276-284, 2008.

MOUGHTON, L. J. *et al.* Effect of time step and data aggregation on cross correlation of residential demands. In: **Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006.** 2008. p. 1-11.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. Assessment of apparent losses in urban water systems. **Water and Environment Journal**, v. 25, n. 3, p. 327-335, 2011.

PEREIRA, L. G.; ILHA, M. Avaliação da submedição de água em edificações residenciais unifamiliares: o caso das unidades de interesse social localizadas em Campinas, no estado de São Paulo. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 2, p. 7-21, 2008.

SILVA, C. M.; DE PÁDUA, V. L.; MARTINS, J. B.. Contribuição ao estudo de medidas para redução da perda aparente de água em áreas urbanas. **Ambiente & Sociedade**, v. 19, n. 3, 2016.

SILVA, R. N. **Estudo de metodologias para avaliação de hidrômetros domiciliares em sistemas de água.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, p. 131. 2008.

SNIS (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO). Disponível em: <www.snis.gov.br/>. Acesso em: 11 jan. 2018

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água.** Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 3ª ed. São Paulo, 2004.

VERTOMMEN, I.; MAGINI, R.; CUNHA, M.. Scaling water consumption statistics. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 5, p. 04014072-1-10, 2014.

YAMANAKA, V. H. A. Desagregación temporal de lecturas acumuladas de consumo de agua potable por medio de métodos estocásticos. **Interciencia**, v. 33, n. 10, p. 725-732, 2008.

YAMANAKA, V. H.; TZATCHKOV, V. Estimación de parámetros del consumo instantáneo de agua potable de lecturas acumuladas. **Ingeniería, investigación y tecnología**, v. 10, n. 3, p. 237-245, 2009.

YAMANAKA, V. H.; TZATCHKOV, V. G.; ARREGUIN-CORTES, F. I. Modeling of drinking water distribution networks using stochastic demand. **Water Resources Management**, v. 26, n. 7, p. 1779-1792, 2012.

APÊNDICE A – ALGORÍTIMOS

1 – Função “horarioverao.mat”

```

function [ matdia ] = horarioverao( matoriginal )
%Corrige as horas dos dias sob horário de verão
%INPUT: matoriginal-> matriz importada do datalogger
%output: matdia->matriz importada do datalogger corrigida

tamanho=size(matoriginal);
mat2=matoriginal(:,2:7);
datas=datetime(mat2);

for i=1:tamanho(1,1)

    data=datas(i,:);
    [y,m,d,h,min,s]=datevec(data);

    if m>=10
        if m==10 && d>=15
            data=data+hours(1);
            [y,m,d,h,min,s]=datevec(data);
            matdia(i,1)=matoriginal(i,1);
            matdia(i,2)=y;
            matdia(i,3)=m;
            matdia(i,4)=d;
            matdia(i,5)=h;
            matdia(i,6)=min;
            matdia(i,7)=s;
            matdia(i,8)=matoriginal(i,8);
        end
        if m==10 && d<15
            matdia(i,1)=matoriginal(i,1);
            matdia(i,2)=y;
            matdia(i,3)=m;
            matdia(i,4)=d;
            matdia(i,5)=h;
            matdia(i,6)=min;
            matdia(i,7)=s;
        end
    end
end

```

```

        matdia(i,8)=matoriginal(i,8);
    end
    if m>10
        data=data+hours(1);
        [y,m,d,h,min,s]=datevec(data);
        matdia(i,1)=matoriginal(i,1);
        matdia(i,2)=y;
        matdia(i,3)=m;
        matdia(i,4)=d;
        matdia(i,5)=h;
        matdia(i,6)=min;
        matdia(i,7)=s;
        matdia(i,8)=matoriginal(i,8);
    end
else
    matdia(i,1)=matoriginal(i,1);
    matdia(i,2)=y;
    matdia(i,3)=m;
    matdia(i,4)=d;
    matdia(i,5)=h;
    matdia(i,6)=min;
    matdia(i,7)=s;
    matdia(i,8)=matoriginal(i,8);
end
end
end

```

2 – Função “discret.mat”

```

function [ mat3,m1 ] = discret(mat,seg)
%Cria uma matriz cujo primeiro termo é o primeiro da matriz de dados do
%datalogger, e vai espaçando em saltos de "seg" segundos
%INPUT: matriz MAT original, com cada valor do datalogger separado por
%coluna; SEG espaçamento em segundos para a discretização
%OUTPUT: a matriz mat3 com os tempos discretizados e a matriz m1 com
%a intensidade de pulsos para cada instante da MAT3

mat2=mat(:,2:7); %pega apenas as colunas que importam da matriz de dados
datas=datetime(mat2); %converte para datetime
tamanho=size(datas); %verifica o tamanho da matriz datetime
ultimo=datas(tamanho(1,1)); %armazena o valor do ultimo elemento da matriz
mat3(1,1)=datas(1); %copia o primeiro elemento datetime original

```

```

divisor=seg/60; %usado para converter a intensidade em L/min
i=2;
verifica(i,1)=datas(1)+seconds(seg); %armazena o segundo valor na matriz
auxiliar

while verifica(i,1) < ultimo %vai preenchendo a matriz mat3 com saltos de
"seg" segundos
    mat3(i,1)=verifica(i,1);
    i=i+1;
    verifica(i,1)=verifica(i-1,1)+seconds(seg);
end

tamanho2=size(mat3); %pega o tamanho da mat3
n=2; %auxiliar
intens=0; %a intensidade do instante inicial é 0
m1(1,1)=0; %a intensidade do instante inicial é 0

for i=2:tamanho2 %percorre os elementos da matriz mat3 e compara com os da
matriz original "datas" para calcular a intensidade de pulsos
    j=1; %auxiliar para o if
    intens=0;
    while mat3(i,1)>datas(n,1) %conta quantos elementos da matriz data
são menores do que o elemento da mat3 em questão

        intens=intens+1; %calcula a intensidade
        intens2=intens/divisor; %converte em L/min
        m1(i,1)=intens2; %armazena a intensidade
        n=n+1; %eleva o contador
        j=2; %auxiliar para evitar o if da sequencia
    end
    if j==1
        m1(i,1)=0; %diz que a intensidade foi 0
    end
end
end
end

```

3 – Função “verificar.mat”

```

function [ ver ] = verificar( mat,matint,tolerancia )
%Verifica se a matriz "mat" discretizada possui intervalos sem consumo
%maiores do que a tolerancia especificada
%INPUT: mat= matriz datetime discretizada

```

```
%matint=matriz com as intensidades discretizadas
%tolerancia=tolerancia em horas
%OUTPUT: ver= matriz que indica os intervalos em que não houve consumo
%(armazena o datetime após constatar o não consumo)
```

```
tamanho=size(mat);
contador=0;
j=0;
r=1;
dif=0;
ver(1,1)=datetime(2017,1,1,1,1,1);
tol=hours(tolerancia)/(mat(2,1)-mat(1,1))
for i=1:tamanho(1,1)
    contador=matint(i,1)+contador;
    if contador==0&&j==1
        dif=dif+1;
    end
    if contador==0&&j==0
        dif=0;
        j=1;
    end
    if contador>0
        j=0;
        contador=0;
    end
    if dif>=tol
        ver(r,1)=mat(i,1);
        r=r+1;
        dif=0;
    end
end
end
```

4 – Função “del.mat”

```
function [ out1,out2 ] = del( mat1,mat2,mat3,mat4 )
%UNTITLED Summary of this function goes here
%INPUT:
%mat1: armazena as linhas a serem eliminadas da matriz mat4 (desejo excluir
%os dias (2,1) e (4,1) da matriz verifica, então entro com 2=mat1(1,1) e
4=mat1(2,1) de input)
%mat2:datetime discretizado, mas sem separação de dias
```

```

%mat3:intensidades discretizada
%mat4:matriz com as ocorrências repetidas (vem da função verifica)
%OUTPUT:
%out1: matriz datetime discretizada com dias excluidos
%out2: matriz intensidade discretizada com dias excluidos

tamanho=size(mat1);

for i=1:tamanho(1,1) %pega todos os dias que eu decidi excluir pelo comando
    dado na matriz mat1
    k=mat1(i,1);
    aux1(i,1)=mat4(k,1); %matriz com os dias que serão excluidos na mat2
end
tamanho=size(aux1);
i=2;
f=2;
mat5(1,1)=aux1(1,1);
while i<=tamanho(1,1)

    [y3,m3,d3]=ymd(aux1(i-1,1));
    t3=datetime(y3,m3,d3);
    [y4,m4,d4]=ymd(aux1(i,1));
    t4=datetime(y4,m4,d4);
    if t4~=t3
        mat5(f,1)=aux1(i,1);
        f=f+1;
    end
    i=i+1;
end

aux1=mat5;
tamanho=size(aux1);

tamanho2=size(mat2);
m=1;
n=1;

for j=1:tamanho2(1,1) %percorre a matriz mat2 datetime copiando todos os
    termos cujos datas nao coincidam com a matriz aux criada

vintp=round(tamanho2(1,1)/5);

```

```

quarp=2*round(tamanho2(1,1)/5);
sep=3*round(tamanho2(1,1)/5);
oip=4*round(tamanho2(1,1)/5);
if j==vintp || j==quarp || j==sep || j==oip
    j
end

[y1,m1,d1]=ymd(mat2(j,1));
t1=datetime(y1,m1,d1);
[y2,m2,d2]=ymd(aux1(m,1));
t2=datetime(y2,m2,d2);

if t1>t2 && m~=tamanho(1,1)
    m=m+1;
end

[y1,m1,d1]=ymd(mat2(j,1));
[y2,m2,d2]=ymd(aux1(m,1));

if y1~=y2 || m1~=m2 || d1~=d2
    out1(n,1)=mat2(j,1); %matriz datetime de saída
    out2(n,1)=mat3(j,1); %matriz intensidade de saída
    n=n+1;
end
end
end

```

5 – Função “separadia2.mat”

```

function [matdia,matintdia]=separadia2(m1,m2)
%A partir das matrizes de dados discretizadas, separa matrizes por dia, com
o
%intervalo de discretização adotado (cada coluna corresponde a um dia)
%INPUT: m1:matriz com os dias discretizados
%m2: matriz com as intensidades discretizadas
%OUTPUT:matdia->matriz datetime em que cada coluna é um dia (1==domingo)
%matintdia-> matriz com as intensidades de todos os intervalos discretos
%(1==domingo)

tamanho=size(m1);%obtem o tamanho da matriz

```

```

i=1;
dia=day(m1(1,1),'dayofweek');

a=1;
b=1;
c=1;
d=1;
e=1;
f=1;
g=1;

for i=1:tamanho(1,1) %percorre toda a matriz m1 discretizada
    dia=day(m1(i,1),'dayofweek');
    if dia==1 %verifica se o dia i é domingo...
        matdia(a,1)=m1(i,1); %armazena o instante discreto na matriz de
retorno
        matintdia(a,1)=m2(i,1); %armazena a intensidade do instante discreto
na matriz de retorno

        a=a+1; %avança o auxiliar
    end
    if dia==2
        matdia(b,2)=m1(i,1);
        matintdia(b,2)=m2(i,1);
        b=b+1;
    end
    if dia==3
        matdia(c,3)=m1(i,1);
        matintdia(c,3)=m2(i,1);
        c=c+1;
    end
    if dia==4
        matdia(d,4)=m1(i,1);
        matintdia(d,4)=m2(i,1);
        d=d+1;
    end
    if dia==5
        matdia(e,5)=m1(i,1);
        matintdia(e,5)=m2(i,1);
        e=e+1;
    end
end

```

```

if dia==6
    matdia(f,6)=m1(i,1);
    matintdia(f,6)=m2(i,1);
    f=f+1;
end
if dia==7
    matdia(g,7)=m1(i,1);
    matintdia(g,7)=m2(i,1);
    g=g+1;
end
end
end

```

6 – Função “separahoraPRP.mat”

```

function [ a1,b1 ] = separahoraPRP( m1,m2,x )

%Separa os dias da matriz com dias discretizados distintos (output da função
separadia2, apos extrair manualmente a coluna desejada) em x intervalos
%INPUT: m1: matriz com dias discretizados
%m2: matriz com intensidades
%x:numero de intervalos de separação do dia. (ESCOLHER NUMEROS QUE RESSPEITEM
A RELAÇÃO i=24/x em que i é inteiro)
%OUTPUT: a1:matriz datetime com os horarios discretizados, cuja colunas
%representam os números dos intervalos escolhidos
%b1:matriz intensidade

intervalo=24/x;
h=0;
ii=24/intervalo;

for h=1:ii
    limites(h,1)=intervalo*h;
end

tamanho=size(m1);
tamanho2=size(limites);

i=1;
hora=hour(m1(1,1));

k=1;

```



```

for i=1:tamanho2(1,1)

    r=1;

    inf=limites(i,1)-intervalo;
    sup=limites(i,1)-1;
    for j=1:tamanho(1,1)
        hora=hour(m1(j,k));
        if hora>=inf && hora<=sup

            if k==1
                a1(r,i)=m1(j,k);
                b1(r,i)=m2(j,k);
                r=r+1;
            end
        end
    end
end
end

```

7 – Função “estatisticas2.mat”

```

function [ med,vari,cova ] = estatisticas2( b1 )
%Calcula a média, variancia e covariancia de lag 1 da série temporal
%discretizada de intensidades de consumo
%INPUT: b1, b2, b3...:matrizes discretizadas de intensidade de consumo,
%sendo que b1 é a do consumo de domingo e assim por diante
%OUTPUT: med, vari e cova: matrizes em que o elemento i,j representa a méd,var
ou cova do dia "i" do intervalo de divisão do dia "j"

tamanho=size(b1);
linha=tamanho(1,1);
linha2=linha-1;
coluna=tamanho(1,2);
med=zeros(1,coluna);
vari=zeros(1,coluna);
cova=zeros(1,coluna);

for i=1:coluna

```

```

med(1,i)=mean(b1(1:linha,i));
vari(1,i)=var(b1(1:linha,i));
covar=cov(b1(1:linha2,i),b1(2:linha,i));
cova(1,i)=covar(1,2);
end
end

```

8 – Função “sceua.mat” (DUAN, 2004)

```

function [bestx,bestf] =
sceua(x0,b1,bu,maxn,kstop,pcento,peps,ngs,iseed,iniflg)

% This is the subroutine implementing the SCE algorithm,
% written by Q.Duan, 9/2004
%
% Definition:
% x0 = the initial parameter array at the start;
%      = the optimized parameter array at the end;
% f0 = the objective function value corresponding to the initial parameters
%      = the objective function value corresponding to the optimized parameters
% b1 = the lower bound of the parameters
% bu = the upper bound of the parameters
% iseed = the random seed number (for repetitive testing purpose)
% iniflg = flag for initial parameter array (=1, included it in initial
%          population; otherwise, not included)
% ngs = number of complexes (sub-populations)
% npg = number of members in a complex
% nps = number of members in a simplex
% nspl = number of evolution steps for each complex before shuffling
% mings = minimum number of complexes required during the optimization
process
% maxn = maximum number of function evaluations allowed during
% optimization (10000)
% kstop = maximum number of evolution loops before convergency (5)
% percento = the percentage change allowed in kstop loops before
% convergency (0.01)

% LIST OF LOCAL VARIABLES
% x(.,.) = coordinates of points in the population
% xf(.) = function values of x(.,.)
% xx(.) = coordinates of a single point in x

```

```

%   cx(.,.) = coordinates of points in a complex
%   cf(.) = function values of cx(.,.)
%   s(.,.) = coordinates of points in the current simplex
%   sf(.) = function values of s(.,.)
%   bestx(.) = best point at current shuffling loop
%   bestf = function value of bestx(.)
%   worstx(.) = worst point at current shuffling loop
%   worstf = function value of worstx(.)
%   xnstd(.) = standard deviation of parameters in the population
%   gnrng = normalized geometri%mean of parameter ranges
%   lcs(.) = indices locating position of s(.,.) in x(.,.)
%   bound(.) = bound on ith variable being optimized
%   ngs1 = number of complexes in current population
%   ngs2 = number of complexes in last population
%   iseed1 = current random seed
%   criter(.) = vector containing the best criterion values of the last
%               10 shuffling loops

```

```

global BESTX BESTF ICALL PX PF

```

```

% Initialize SCE parameters:

```

```

nopt=length(x0);
npg=2*nopt+1;
npg=100000;
nps=nopt+1;
nspl=npg;
mings=ngs;
npt=npg*ngs;

```

```

bound = bu-bl;

```

```

% Create an initial population to fill array x(npt,nopt):

```

```

rand('seed',iseed);
x=zeros(npt,nopt);
for i=1:npt;
    x(i,:)=bl+rand(1,nopt).*bound;
end;

```

```

if iniflg==1; x(1,:)=x0; end;

```

```

nloop=0;

```

```

icall=0;
for i=1:npt;
    xf(i) = fent(nopt,x(i,:));
    icall = icall + 1;
end;
f0=xf(1);

% Sort the population in order of increasing function values;
[xf,idx]=sort(xf);
x=x(idx,:);

% Record the best and worst points;
bestx=x(1,:); bestf=xf(1);
worstx=x(npt,:); worstf=xf(npt);
BESTF=bestf; BESTX=bestx; ICALL=icall;

% Compute the standard deviation for each parameter
xnstd=std(x);

% Computes the normalized geometric range of the parameters
gnrng=exp(mean(log((max(x)-min(x))./bound)));

disp('The Initial Loop: 0');
disp(['BESTF   : ' num2str(bestf)]);
disp(['BESTX   : ' num2str(bestx)]);
disp(['WORSTF  : ' num2str(worstf)]);
disp(['WORSTX  : ' num2str(worstx)]);
disp(' ');

% Check for convergency;
if icall >= maxn;
    disp('*** OPTIMIZATION SEARCH TERMINATED BECAUSE THE LIMIT');
    disp('ON THE MAXIMUM NUMBER OF TRIALS ');
    disp(maxn);
    disp('HAS BEEN EXCEEDED.  SEARCH WAS STOPPED AT TRIAL NUMBER:');
    disp(icall);
    disp('OF THE INITIAL LOOP!');
end;

if gnrng < peps;

```

```

        disp('THE POPULATION HAS CONVERGED TO A PRESPECIFIED SMALL PARAMETER
SPACE');
end;

% Begin evolution loops:
nloop = 0;
criter=[];
criter_change=1e+5;

while icall<maxn & gnrng>peps & criter_change>pcento;
    nloop=nloop+1;

    % Loop on complexes (sub-populations);
    for igs = 1: ngs;

        % Partition the population into complexes (sub-populations);
        k1=1:npg;
        k2=(k1-1)*ngs+igs;
        cx(k1,:) = x(k2,:);
        cf(k1) = xf(k2);

        % Evolve sub-population igs for nspl steps:
        for loop=1:nspl;

            % Select simplex by sampling the complex according to a linear
            % probability distribution
            lcs(1) = 1;
            for k3=2:nps;
                for iter=1:1000;
                    lpos = 1 + floor(npg+0.5-sqrt((npg+0.5)^2 -
npg*(npg+1)*rand));
                    idx=find(lcs(1:k3-1)==lpos); if isempty(idx); break;
                end;
                lcs(k3) = lpos;
            end;
            lcs=sort(lcs);

            % Construct the simplex:
            s = zeros(nps,nopt);
            s=cx(lcs,:); sf = cf(lcs);

```

```

[snew,fnew,icall]=cceua(s,sf,bl,bu,icall,maxn);

% Replace the worst point in Simplex with the new point:
s(nps,:) = snew; sf(nps) = fnew;

% Replace the simplex into the complex;
cx(lcs,:) = s;
cf(lcs) = sf;

% Sort the complex;
[cf,idx] = sort(cf); cx=cx(idx,:);

% End of Inner Loop for Competitive Evolution of Simplexes
end;

% Replace the complex back into the population;
x(k2,:) = cx(k1,:);
xf(k2) = cf(k1);

% End of Loop on Complex Evolution;
end;

% Shuffled the complexes;
[xf,idx] = sort(xf); x=x(idx,:);
PX=x; PF=xf;

% Record the best and worst points;
bestx=x(1,:); bestf=xf(1);
worstx=x(npt,:); worstf=xf(npt);
BESTX=[BESTX;bestx]; BESTF=[BESTF;bestf]; ICALL=[ICALL;icall];

% Compute the standard deviation for each parameter
xnstd=std(x);

% Computes the normalized geometric range of the parameters
gnrng=exp(mean(log((max(x)-min(x))./bound)) );

disp(['Evolution Loop: ' num2str(nloop) ' - Trial - ' num2str(icall)]);
disp(['BESTF : ' num2str(bestf)]);
disp(['BESTX : ' num2str(bestx)]);

```

```

disp(['WORSTF : ' num2str(worstf)]);
disp(['WORSTX : ' num2str(worstx)]);
disp(' ');

% Check for convergency;
if icall >= maxn;
    disp('*** OPTIMIZATION SEARCH TERMINATED BECAUSE THE LIMIT');
    disp(['ON THE MAXIMUM NUMBER OF TRIALS ' num2str(maxn) ' HAS BEEN
EXCEEDED!']);
    end;

if gnrng < peps;
    disp('THE POPULATION HAS CONVERGED TO A PRESPECIFIED SMALL PARAMETER
SPACE');
    end;

criter=[criter;bestf];
if (nloop >= kstop);
    criter_change=abs(criter(nloop)-criter(nloop-kstop+1))*100;
    criter_change=criter_change/mean(abs(criter(nloop-kstop+1:nloop)));
    if criter_change < pcento;
        disp(['THE BEST POINT HAS IMPROVED IN LAST ' num2str(kstop) '
LOOPS BY ', ...
            'LESS THAN THE THRESHOLD ' num2str(pcento) '%']);
        disp('CONVERGENCY HAS ACHIEVED BASED ON OBJECTIVE FUNCTION
CRITERIA!!!')
        end;
    end;

% End of the Outer Loops
end;

disp(['SEARCH WAS STOPPED AT TRIAL NUMBER: ' num2str(icall)]);
disp(['NORMALIZED GEOMETRIC RANGE = ' num2str(gnrng)]);
disp(['THE BEST POINT HAS IMPROVED IN LAST ' num2str(kstop) ' LOOPS BY ',
...
    num2str(criter_change) '%']);

% END of Subroutine sceua
return;

```

9 – Função “parametros.mat”

```

function [ unad, dnad, ut, pr0, uq, nah, volume,dura,primeiros,outros ] =
parametros( al,b1,c1,d1,x )

% al: matriz datetime output da função separahoraPRP
% b1: matriz intensidade output da função separahoraPRP
% c1: matriz datetime discretizada original
% d1: matriz intensidade discretizada original
% x: numero de intervalos do dia

linhas=size(b1,1);
colunas=x;
m=1;
aux=0;
anterior=0;
contnah=zeros(1,x);

for k=1:colunas
    anterior=0;
    for h=2:linhas
        int1=b1(h-1,k);
        int2=b1(h,k);

        if int2~=0 && int1==0
            contnah(1,k)=anterior+1;
            anterior=contnah(1,k);
        end
    end
end

linhas2=size(d1,1);
aux=0;
duracao=0;
m=1;
d=1;
gg=1;
for g=2:linhas2
    int1=d1(g-1,1);
    int2=d1(g,1);
    dia1=day(c1(g-1,1));
    dia2=day(c1(g,1));

```



```

if dia2~=dia1
    d=d+1;
    gg=1;
end

if int2==0 && int1~=0
    aux=0;
    m=m+1;

end

if int2~=0 && aux==1
    duracao=duracao+1;
    dura(m,1)=duracao;

end

if int2~=0 && int1==0
    duracao=1;
    dura(m,1)=duracao;
    aux=1;
    r=g;
    int3=int2;
    vol=0;
    while int3~=0 && r~=linhas2

        vol=vol+int3;
        r=r+1;
        int3=d1(r,1);
    end

    volume(gg,d)=vol;
    gg=gg+1;

end
end

intensidades=nonzeros(d1);
linhas3=size(intensidades,1);
conta=0;

```

```

for h=2:linhas3
    int1=intensidades(h-1,1);
    int2=intensidades(h,1);

    if int2==int1
        conta=conta+1;
    end
end

linhas4=size(d1,1);
d=1;
cont=0;
contigual=0;
w=1;
q=1;
for v=2:linhas4
    int1=d1(v-1,1);
    int2=d1(v,1);

    if int2==0
        d=0;
    end

    if int2~=0 && d==1
        cont=cont+1;
        outros(q,1)=int2; %matriz com todas as intensidades que não iniciam
clusteres
        q=q+1;
        if int2==int1
            contigual=contigual+1; %conta sempre que ocorre uma intensidade
igual a anterior para cada cluster diferente
        end
        d=d+1;
    end

    if int2~=0 && int1==0
        d=1;
        primeiros(w,1)=int2; %matriz com todas as intensidades que iniciam
os clusteres
        w=w+1;
    end
end

```

```

end

pr0=sum(contigual)/sum(cont);

vol=volume;
vol(vol>0)=1;
volume=sum(volume);
contdia=sum(vol);
nah=contnah/sum(contnah);
blabla=conta/(linhas3-1);
unad=mean(contdia);
dnad=std(contdia);
ut=mean(dura);
uq=mean(mean(intensidades));

end

```

10 – Função “nsrp.mat”

```

function [ matdia,matint ] = nsrp( a,n,x,num,discret )
%Implementação do modelo NSRP
%INPUT: a=dia da semana da série sintética (a=1 domingo, a=2 segunda...)
% n= numero intervalos de separação do dia
% x= matriz com os parâmetros obtidos pela otimização (x(1,:)=parâmetros
% do primeiro intervalo do dia)
% num= numero de dias a serem gerados
% discret= discretização adotada (discret = 1 -> 1 em 1 minuto)

intervalo=24/n;
ii=24/intervalo;
ajustadia=a+1;
dia=datetime(2000,1,ajustadia,0,0,0);
tal=intervalo*60/discret;
linhas=1440/discret;
fim=linhas*num;

matint=zeros(fim,1); %inicia a matriz
%matdia= repmat(datetime(0,0,0,0,0,0),fim,1); %inicia a matriz

for i=1:num

```

iniciodia=(i-1)*linhas+1;%alterei acrescentando o +1 (ver se da erro).
 Não verifiquei a compatibilidade para discretizações maiores do que 1

```

for j=1:ii
    tempodbac=(j-1)*intervalo*60+iniciodia; %calcula o tempo de
início do intervalo

    matint(tempodbac:fim,1)=0; %inicia o intervalo zerando as
intensidade (feito para prevenir que db do intervalo anterior influencie
neste)

    db(i,j)=poissrnd(x(j,1)*tal); %verifica quantos db vao ocorrer no
intervalo

    for k=1:db(i,j)
        tempodb=exprnd(1/x(j,1)); %calcula o tempo de início do db
        tempodbac=tempodb+tempodbac; %calcula o tempo acumulado de
início do db

        iniciodb2=round(tempodbac,0); %minuto de início do db
        ed=poissrnd(x(j,2)); %verifica quantas ed serao geradas por db
        for m=1:ed %percorre cada ed do db
            tempoed=exprnd(1/x(j,5));%
            duracaoed=exprnd(1/x(j,4)); %
            intensidadeed=exprnd(x(j,3));
            vol=intensidadeed*duracaoed/ceil(duracaoed);
            inicioed=iniciodb2+round(tempoed);
            fimed=inicioed+ceil(duracaoed);

            if fimed<=fim
                if inicioed==0 %para resolver o bug de indice negativo
                    inicioed=1;
                    fimed=inicioed+round(duracaoed,0);

                end

                matint(inicioed:fimed,1)=matint(inicioed:fimed,1)+vol;
            end
        end
    end
end

aux2=1;
aux1=0;

```

```

for t=1:fim
    if aux2==1
        aux1=0;
    end
    if aux2==0
        aux1=1;
    end
    if t==1
        matdia(t,1)=dia;
    else
        if aux1==0
            matdia(t,1)=matdia(t-1,1)+seconds(60*discret);
        end
        if aux1==1
            matdia(t,1)=datetime(year(matdia(t-1,1)),month(matdia(t-1,1)),day(matdia(t-1,1)),0,0,0)+day(7);
        end
    end
    aux2=mod(t,1440);
end
end

```

11 – Função “op.mat”

```

function [ matdia,matint,vetorlambda,vetornah,vetornad ] = op(a,dias,intervalos,discret, unad,dnad,nah,ut,uq,pr0 )
%Implementação do modelo OP
%INPUT: a=dia da semana da série sintética (a=1 domingo, a=2 segunda...)
%dias=numero de dias da serie sintetica
%intervalos=numero de intervalos nao homogeneos do dia adotado na parametrização
%discret=discretização adotada (ex: 1-> 1 min)
%unad= media do Nad obtido na parametrização
%dnad=desvio padrao obtido na parametrização
%nah=vetor com os pesos (alfas) de cada intervalo nao homogeneo
%ut=media da duração dos clusters
%uq=media das intensidades dos clusters

ajustadia=a+1;
dia=datetime(2000,1,ajustadia,0,0,0);
tempodiscreto=1440/discret; %numero de segmentos discretos em 1 dia

```

```

duracaointervalo=tempodiscreto/intervalos; %duracao de cada intervalo nao
homogeneo do dia em termos de segmentos discretos

for i=1:dias
    vetornad(1,i)=normrnd(unad,dnad); %gera por metodo de montecarlo os Nad
end
for j=1:dias
    for i=1:intervalos
        vetornah(j,i)=vetornad(1,j)*nah(1,i); %obtem o vetor com os Nah a partir
dos pesos (alfas)
    end
end
for j=1:dias
    for i=1:intervalos
        vetorlambda(j,i)=vetornah(j,i)/(duracaointervalo-vetornah(j,i)*(ut-1));
%obtem o vetor de lambdas
        vetorp(j,i)=vetorlambda(j,i)*discret; %obtem as probabilidades de
Bernoulli
    end
end
v=1;
y=1;
for i=1:dias %percorre os dias
    for j=1:intervalos %percorre os intervalos dos dias
        k=0;
        y=(i-1)*(tempodiscreto)+(j-1)*duracaointervalo+1; %correção para a
linha (as vezes o bloco de demanda avança no prox intervalo)
        while k<duracaointervalo %percorre os tempos discretos dentro do
intervalo
            if j==1 && k==0
                aux=1; %auxiliar criado para dar os saltos dos dias em cada
semana
            else
                aux=0;
            end

            cluster=binornd(1,(vetorlambda(i,j)*discret)); %verifica se ocorre a
demanda
            if cluster==1 %caso ocorra demanda
                v=v+1;
                duracao=exprnd(ut); %calcula a duração do cluster em minutos
                duracaodiscret=round(duracao/discret); %calcula a duração do
cluster em unidades discretas de tempo

                for m=1:duracaodiscret %percorre o cluster

```

```

if m==1 %se for o início do cluster...
    int=exprnd(uq);
else
    persist=binornd(1,pr0); %avalia a persistencia da demanda
    if persist==1 %se persistir...
        int=matint(y-1,1);
    else %se não persistir...
        int=exprnd(uq);
    end
end

if y==1 %se for o primeiro minuto de toda a série
    matdia(y,1)=dia;
    aux=0;

    matint(y,1)=int;
    y=y+1;
    k=k+discret;
else %se não for o primeiro minuto da série...
    matdia(y,1)=matdia(y-
1,1)+seconds(60*discret)+days(6)*aux;
    aux=0;
    matint(y,1)=int;
    y=y+1;
    k=k+discret;
end
end
else %caso não ocorra demanda
    if y==1 %se for o primeiro minuto de toda a série
        matdia(y,1)=dia;
        y=y+1;
        matint(y,1)=0;
        k=k+discret;
    else %se não for o primeiro minuto de toda a série
        matdia(y,1)=matdia(y-1,1)+seconds(60*discret)+days(6)*aux;
        matint(y,1)=0;
        y=y+1;
        k=k+discret;
    end
end
end
end
end

```

```

end

matdia=matdia(1:tempodiscreto*dias,:); %ajusta o tamanho da matriz final (as
vezes ocorria um bloco de demanda no ultimo min da serie, que acabava
estendendo a duração total...)

matint=matint(1:tempodiscreto*dias,:);

end

```

12 – Função “subtracao.mat”

```

function [ matintsem,matintcom,contagem ] = subtracao(matdia, matint )

%Subtrai 1 do valor de cada intensidade maior do que 0 (método de subtração
das demandas)

tamanho=size(matint);
matintsem=zeros(tamanho(1,1),1);
matintcom=zeros(tamanho(1,1),1);
a=1;
contagem(1,1)=0;
b=0;
for i=1:tamanho(1,1) %percorre a matriz intensidades
    int=matint(i,1);
    dia2=day(matdia(i,1));
    if i~=1
        dia1=day(matdia(i-1,1));
    end
    if int>=1 %ativa quando detecta intensidade maior ou igual a 1
        matintsem(i,1)=int-1;
        matintcom(i,1)=1;
        if b==0
            contagem(a,1)=contagem(a,1)+1; %feito para nao dar erro caso tenha
intensidade 1 no começo da série
        else
            contagem(a,1)=1;
            b=0;
        end
    end
    if i~=1
        if dia2~=dia1
            a=a+1;
            b=1;
        end
    end
end
end

```



```
end
end
```

13 – Função “gerademanda.mat”

```
function [ media,dpadrao,matob,matrizvarsint2 ] = gerademanda(
volumeob,contagemob,ndias,volumesint,iteracoes )

%Gera uma contagem aleatória de demandas diárias, a partir da distribuição
lognormal, considerando o coeficiente de correlação de Pearson das demandas
observadas

%INPUT: volumeob=série com os volumes observados diários (na ordem correta)
%       contagem=série com a contagem das demandas diárias (na ordem
%       correta)
%       ndias=numero de dias que será gerada a demanda
%       volumesint=série com os volumes diários da série sintética (na
%       ordem correta)
%       iteracoes = numero de iterações no método Iman

param=lognfit(contagemob);
media=param(1);
dpadrao=param(2);

contagem2=round(lognrnd(media,dpadrao,ndias,1)); %gera aleatoriamente as
demandas diarias

volumesint=volumesint';
matrizvarsint=[volumesint contagem2];
matob=[volumeob' contagemob];
mat=matrizvarsint;

for i=1:iteracoes
matrizvarsint2=iman(mat,volumeob,contagemob); %reordena a matriz com as
demandas diárias e os volumes buscando a mesma correlação da matriz observada
mat=matrizvarsint2;
end
end
```

14 – Função “iman.mat”

```
function [ xi ] = iman( x,volumeob,contagemob )
```

```

%Reordena os valores da matriz X, considerando a correlação observada (método
de Iman e Conover)

    input: x=matriz das variaveis que se deseja alterar modificar a ordem
%         volumeob=matriz dos volumes observados diarios (na ordem certa)
%         contagemob=matriz com a contagem das demandas diárias (na ordem
%         certa)
%     output: xi=matriz x redordenada
volumeob=volumeob';
mat=[volumeob contagemob];
r=corr(mat); %correlação de Pearson

rankx=[ranking(x(:,1)) ranking(x(:,2))];
P = chol(r);
P=P';
T = corr(rankx);
Q=chol(T);
Q=Q';
S = P * inv(Q);
xb= rankx*S';
tamanho=size(rankx);

for j=1:tamanho(1,2)
    [a1,a2]=ranking(xb(:,j));
    [v1,v2]=sort(x(:,j));
    for i=1:tamanho(1,1)
        xi(a2(i,1),j)=v1(i,1);
    end
end
end

```

15 – Função “distribuicao.mat”

```

function [ intmod ] = distribuicao( dia,int,matrizvarsint2,nahob )
%Adiciona as demandas unitárias na série de intensidades geradas
%     INPUT: dia = matriz dos dias output da função "op"
%           int = matriz intensidades output da função "op"
%           matrizvarsint2 = output da função "gerademanda"
%           nahob = vetor com as probabilidades das demandas para cada
%           intervalo, output da função "parametros"

demandas=matrizvarsint2(:,2);

```

```

tamanho=size(dia);

j=0;
dia1=0;
for i=1:tamanho(1,1) %adiciona as demandas unitarias nas demandas existentes
da série sintética
    dia2=day(dia(i,1));
    if i>1
        dia1=day(dia(i-1,1));
    end
    if dia2~=dia1
        j=j+1;
        adicionar=demandas(j,1);
    end
    if int(i,1)>0
        int(i,1)=int(i,1)+1;
        adicionar=adicionar-1;
        if adicionar>0
            restantes(j,1)=adicionar;
        else
            restantes(j,1)=0;
        end
    end
end

numerodias=size(demandas);
intervalos=size(nahob);

for i=1:numerodias(1,1) %calcula o numero de demandas remanescentes por
intervalo, por dia
    for h=1:intervalos(1,2)
        demandaintervalo(h,i)=nahob(1,h)*restantes(i,1);
        demandaintervalo(h,i)=round(demandaintervalo(h,i));
    end
end

contademanda=int;
contademanda(contademanda>0)=1;
numerodiscret=1440/intervalos(1,2);

for i=1:numerodias(1,1) %calcula o numero de espaços vazios na série sintética
de intensidades

```

```

for h=1:intervalos(1,2)
    inicio=1440*(i-1)+numerodiscret*(h-1)+1;
    fim=inicio+numerodiscret-1;
    numdemanda=sum(contademanda(inicio:fim,1));
    vazios(h,i)=numerodiscret(1,1)-numdemanda;
end
end

for i=1:numerodias(1,1) %calcula as probabilidades de ocorrencia de demanda
unitária nos intervalos
    for h=1:intervalos(1,2)
        prob(h,i)=demandaintervalo(h,i)/vazios(h,i);
    end
end

intmod=int;

for i=1:tamanho(1,1)-1 %percorre a série de intensidades original adicionando
demanda unitarias nos espaços vazios

    diacorrido=floor(i/1440)+1;
    intervaloatual=floor((i-(diacorrido-1)*1440)/numerodiscret)+1;
    if int(i,1)==0
        ocorrencia=rand();
        p=1-prob(intervaloatual,diacorrido);
        if ocorrencia>=p
            intmod(i,1)=1;
        end
    end

end
end
end

```