

XI-1289 - MODELAGEM ESTOCÁSTICA DA DEMANDA DE ÁGUA, ANÁLISE E PARÂMETROS DE CONSUMO

Vanessa Silva Santos⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Estadual de Feira de Santana. Mestranda de Meio Ambiente Águas e Saneamento da Universidade Federal da Bahia.

Eduardo Cohim⁽²⁾

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Mestre em Tecnologias Limpas pela Universidade Federal da Bahia. Doutor em Energia e Meio Ambiente pela Universidade Federal da Bahia.

Anderson de Souza Matos Gadéa⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual de Feira de Santana. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Endereço⁽¹⁾: Rua Professor Aristides Novis, 2 – Federação- Salvador – Bahia – CEP: 40210-630 - e-mail: v.ss@ufba.br.

RESUMO

Diante de uma tendência inexorável resultante da restrição da oferta de água dos mananciais próximos às cidades aliado a expansão dos centros urbanos e crescimento populacional, é intensificada a busca por soluções que otimizem a gestão da demanda de água. A gestão da demanda requer uma melhor determinação dos perfis de consumo em conciliação com aplicações de medidas que explorem o uso racional da água. Nesse contexto, um modelo preditivo da demanda de água residencial foi desenvolvido a partir de uma abordagem estocástica do consumo dos microcomponentes de uma residência na resolução de 1min, que se traduz na soma de todas as contribuições do sistema, a fim de se obter a demanda total instantânea da unidade familiar. Com potencial de apoio no planejamento dos SAA's, o modelo foi calibrado através de dados sociodemográficos, do IBGE, e revisão bibliográfica de dados estatísticos dos usuários e usos finais de habitações brasileiras, tal como o padrão comportamental do morador, ocorrência de eventos de demanda e especificações dos aparelhos hidrossanitários. A demanda instantânea é obtida através da superposição de pulsos de intensidade constante e horário de chegada e duração variáveis. Como resultados, obtêm-se a caracterização do consumo intradomiciliar, total e por dispositivo hidrossanitário em comparação com resultados da realidade brasileira, a geração de hidrogramas em populações de 50 a 50 mil residências com e sem substituição por aparelhos economizadores e, também, têm-se uma definição mais precisa do coeficiente K2 em relação ao exposto na NBR 9649 (1986).

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Estocástica, Usos Finais, K₂, Gestão da Demanda.

INTODUÇÃO

A restrição da oferta de água em áreas urbanas requer uma análise mais detalhada da demanda de água, que não se limite aos consumos per capita, e sim que melhor embasem e determinem os impactos gerados pela implantação das medidas de gestão da demanda. Compreender onde e quando as pessoas usam água em suas casas, coletando informações sobre a contribuição de vários aparelhos para o uso total de água, a divisão relativa entre uso interno e externo e /ou variações sazonais e geográficas no consumo de água é essencial para determinar as prováveis demandas futuras de abastecimento de água, detectando vazamentos no sistema, projetar programas de gerenciamento de demanda e suas intervenções, como substituição de aparelhos e oferta de fontes alternativas de água (GIURCO et. al, 2008).

A principal função do abastecimento domiciliar de água é o suprimento das necessidades básicas de seus residentes (STEC, 2019). No Brasil o consumo per capita varia em torno de 100-150L e alguns estudos especificam o consumo por uso final em diferentes regiões de estudo, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Média do consumo per capita e sua porcentagem por autor e região de estudo

Autor -Cidade	Consumo <i>per capita</i> por tipo de aparelho em L/hab.dia
---------------	---

	Chuveiro	Bacia Sanitária	Lavatório	Pia da cozinha	Tanque	Máquina de lavar	Outros	Total
Botelho (2013) ¹ / Salvador	21,1	24,1	4,0	16,6	20,1	33,8	3,4	123,1
Barreto (2008) / São Paulo	35,3	14	10,8	30,3	13,6	27,7	77,4	209,1
Cohim et al. ⁴ (2009) / Salvador	31,43	18,8	8,7	25,0	14,6	-	-	80,16
Sant'ana et al. ² (2017) / Brasília	33	27	10	29	14	25	6,5	144,5

¹Análise feita por Botelho (2013) numa residência com renda de até 2 salários-mínimos sem a intervenção de medidas de gestão da demanda; ² Valores de consumo per capita para residência de até 2 salários-mínimos; ⁴Pesquisa feita com famílias de baixa renda em Salvador.

A partir da análise da Tabela 1, pode-se observar que, independentemente da região, os banheiros representam o maior ponto de consumo de água, respondendo por mais da metade do consumo doméstico de água. Em alguns locais, o consumo de vasos sanitários e chuveiros é relativamente semelhante, justificando a necessidade de investimento de energia e recursos em pesquisas sobre práticas de reuso.

A variabilidade de consumo em regiões diferentes de estudo, como apresentado na Tabela 1, também evidenciam a necessidade de se considerar outros fatores intervenientes de consumo, como características demográficas, geográficas e culturais. Abu-Bakar, Williams e Hallett (2021) propuseram uma classificação para os fatores determinantes da demanda de água residencial entre exógenos (ambientais), comportamentais (psicossociais) e endógenos (contextuais), de modo que cada uma pode influir tanto no consumo final, quanto no consumo de cada aparelho hidrossanitário em cada habitação, como mostra a Figura 1.

Outrossim, é preciso conhecer melhor os perfis diários de consumo para diferentes populações e modelos de edificações. Sabe-se que o coeficiente de máxima vazão horária é fortemente influenciado pelo tamanho da população, podendo assumir valores maiores que o preconizado na ABNT NBR 9649 (1986), como evidenciado pelas equações de Babbitt e Baumann (1958), Giffit (1945), Johnson (1942) e Harmon (1918). Paralelamente, van Durren *et al.* (2019) alegam que o coeficiente também pode sofrer variações influenciadas pela adoção de medidas voltadas ao uso racional e implementação de aparelhos hidrossanitários mais eficientes.

A implementação de aparelhos economizadores também são umas das estratégias do benchmarking de água em edificações (

Essas informações, embora importantes, não são fáceis de conhecer, só através de medidas que requerem custos altos de investimento e operações, como o uso de medidores inteligentes em cada ponto de consumo das residências e, devido a isso, há uma grande variabilidade de metodologias aplicadas e modelos criados com a finalidade de caracterização da demanda de água e suas projeções futuras (GHAELEKHONDABI et al. 2017).

Um software com metodologia estocástica supre a necessidade de obtenção dessas informações por um custo muito inferior. Um processo estocástico se dá por uma variável que se comporta, durante o tempo, de uma maneira onde pelo menos parte é considerada randômica, logo, a partir da modelagem estocástica é possível avaliar vários cenários distintos e independentes.

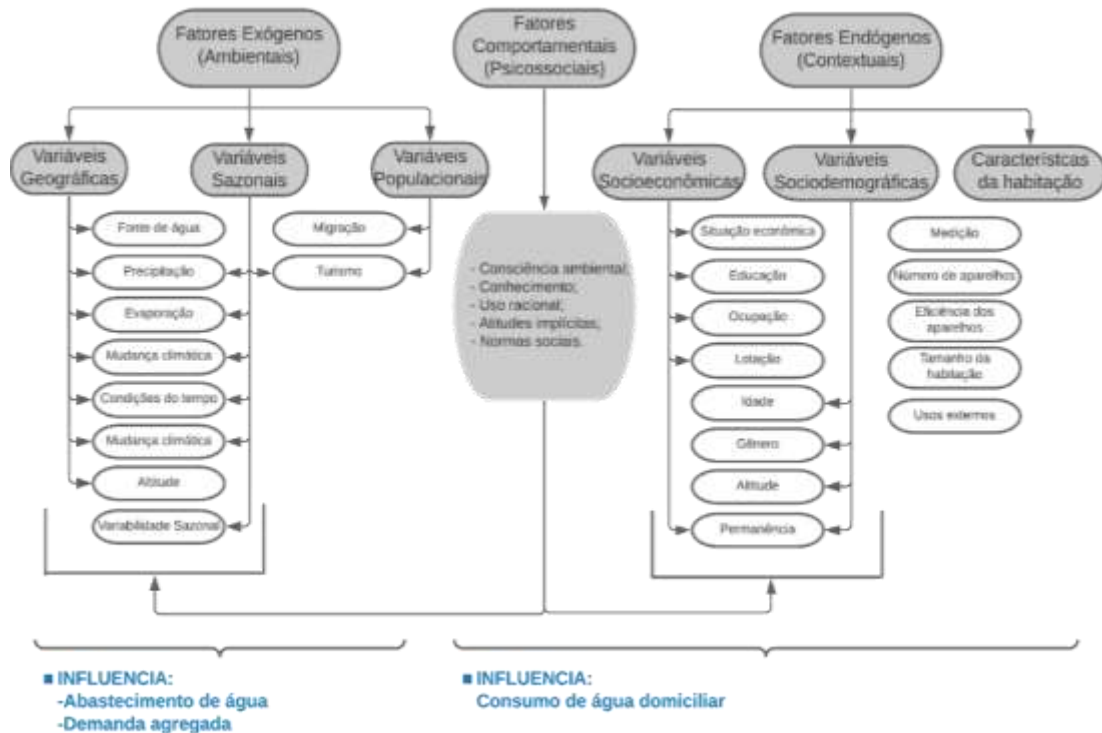


Figura 1: Fatores determinantes de consumo
Fonte: adaptado de Abu-Bakar, Williams e Hallett (2021)

A partir do método estocástico, existem duas principais formas de obtenção do consumo residencial, seja ela pela obtenção da demanda como um todo, sem a caracterização dos microcomponentes, ou pela soma dos pulsos de demanda de cada uso final. Nesses métodos, a vazão é obtida através da superposição de pulsos retangulares, Figura 2, em que a vazão total representa a soma de todos os pulsos de duração e intensidade associados a um horário de ocorrência. Alguns modelos e aplicações são referenciados na Tabela 2.

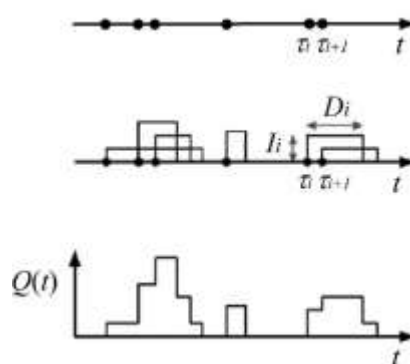


Figura 2: Metodologia de superposição de pulsos retangulares.
Fonte: Creaco, Blokker e Buchberger (2017)

Buchberger e Wu (1995) apresentaram o primeiro modelo estocástico para demandas residenciais de água. Esta abordagem assume que os pulsos retangulares de Poisson (PRP) podem ser usados para simular a intensidade, duração e frequência do consumo de água em uma residência. O modelo concebe o domicílio como um todo, de modo que os parâmetros do PRP e as funções de probabilidade podem ser ajustados com base nas medições de vazão em residências monitoradas (Buchberger e Wells 1996). Este método estabeleceu uma base para a análise, sobre a qual vários outros modelos de pulso foram apresentados (ver Creaco et al. 2017 para uma revisão da literatura). Posteriormente, surgiu uma alternativa aos métodos disponíveis: o chamado modelo SIMDEUM (BLOKKER, 2010). O SIMDEUM é um

modelo que obtém a demanda geral de água em uma residência agregando os pulsos de demanda dos microcomponentes para cada habitante (ou seja, usuário final) em um nível de instalação (por exemplo, torneira, chuveiro, máquina de lavar) (CREACO et al., 2017). Em vez de depender de medições de vazão como o primeiro tipo de modelos, a abordagem de uso final é alimentada com parâmetros baseados em levantamentos. Isso implica lidar com um maior número de parâmetros de entrada, que são mais fáceis de obter (ou seja, pesquisas em vez de campanhas experimentais). O modelo SIMDEUM original baseia-se em simulações de Monte Carlo. Cada simulação fornece um padrão de demanda de água de alta resolução. A resolução espacial pode ser ajustada agregando as demandas de pulso conforme necessário, e uma pequena escala de tempo (1 segundo) é usada (BLOKKER et al. 2010). Modelos PRP-like e SIMDEUM provaram dar resultados semelhantes para diferentes escalas espaciais e temporais (CREACO et al. 2017).

Tabela 2: Modelos estocásticos para estimação da demanda residencial

Autor	Modelo	Região de aplicação	Aplicações
Buchberger and Wu (1995)	PRP (pulsos horários gerados através do processo de Poisson, com pulsos de duração e intensidade gerados por distribuições de probabilidade monovariadas),	Cincinnati (EUA)	Determinação da vazão Q como a soma de todos os pulsos, sem distinção de aparelhos e determinação do número de Reynolds do sistema.
Creaco et al. (2016a)	Cor-PRP (pulsos horários gerados através do processo de Poisson, com pulsos de duração e intensidade gerados por distribuições de probabilidade bivariadas)	Milford (EUA)	Determinação da vazão Q como a soma de todos os pulsos, sem distinção de aparelhos.
Blokker (2011)	SIMDEUM (pulsos horários dependentes da frequência de uso e rotina dos usuários, com duração e frequência associadas a cada pulso)	Milford (EUA), Holanda	Determinação da vazão Q como a soma de todos os pulsos de cada evento de uso por morador e aparelho.
Ferreira e Gonçalves (2019)	Pulsos horários dependentes da frequência de uso e rotina dos usuários, com duração e frequência associadas a cada pulso	São Paulo (Brasil)	Determinação da vazão Q como a soma de todos os pulsos de cada evento de uso por morador e aparelho; análise da substituição de aparelhos de maior pressão no sistema hidráulico.

O principal diferencial dos modelos de Blokker (2011) e Ferreira e Gonçalves (2019), que inspirou o modelo desenvolvido neste trabalho, é o fato deles associarem características de cada uso final aos moradores dos domicílios. Nesses modelos a demanda é gerada por cada acessório, de cada unidade familiar, de cada uso-final, sendo cada um associado a uma distribuição de probabilidade. As distribuições de probabilidade são utilizadas para descrever os hábitos dos ocupantes das unidades habitacionais a fim de identificar os momentos com maior probabilidade de uso dos componentes do sistema.

METODOLOGIA

Neste trabalho, tendo como referência o SIMDEUM, foi simulado um pulso retangular de demanda para cada usuário em cada aparelho sanitário, o qual ocorre num determinado horário, com uma duração e intensidade específica. Como mostrado na Figura 3, um pulso retangular é definido como um evento de uso que se inicia a determinado horário “t”, com a vazão “q” constante até o fim de sua duração “d”.

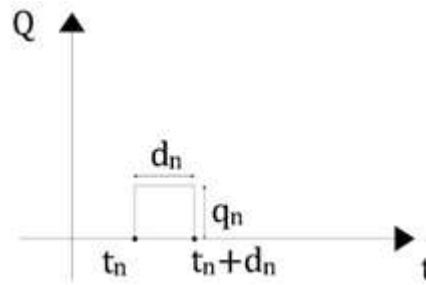


Figura 3: Esquematização de um pulso retangular de demanda.

Por fim, a demanda total Q é obtida através da soma de todos os pulsos retangulares de todos os aparelhos, tal qual a Equação 1, onde $F_{m;n}$ é a frequência de acionamento de aparelhos sanitários de cada morador, em cada residência, associada a uma vazão e duração específica.

$$Q = \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^{F_{m;n}} (q_f ; d_f)_t \quad \text{equação (1)}$$

Os demais índices da equação representam:

- q_f – Vazão de uso de um aparelho sanitário, associada a uma frequência;
- d_f – Duração de uso de um aparelho sanitário, associada a uma frequência;
- f – Índice de frequência de uso associado a cada aparelho e a cada morador;
- t – Instante de acionamento de um aparelho sanitário;
- $F_{m;n}$ – Número total de utilizações do aparelho sanitário “n” pelo morador “m”;
- N – Número total de aparelhos sanitários;
- n – índice de número de aparelhos;
- M – Número total de moradores de determinada residência;
- m – índice de número de moradores de determinada residência;
- R – Número total de residências;
- r – índice de número de residências simuladas;
- Q – Vazão total.

Em relação aos componentes do sistema hidrossanitário residencial, são identificados todos os usos finais e, para cada uso é definida uma distribuição de probabilidade para caracterização dos pulsos de frequência de uso, duração e intensidade, logo podemos separar os parâmetros do sistema entre dependentes das características dos usuários e das características dos aparelhos, como ilustrado na Figura 4, que se comportam como variáveis aleatórias que têm a probabilidade de cada valor associada a uma função de probabilidade.



Figura 4: Variáveis de maior influência do modelo

A determinação das distribuições de probabilidade que melhor se ajustaram é feita através da análise do resultado dos testes de normalidade e do erro dos ajustes. Para isso um dos testes utilizados é o de Kolmogorov-Smirnov (KS) e a verificação do erro padrão.

- Geração de moradores de cada domicílio

Na construção do modelo e na definição do domicílio é necessário definir a quantidade de moradores e a idade de cada um, por tipo de habitação. A fim de garantir a estocasticidade do modelo, pode-se projetar randomicamente a quantidade e idade dos moradores por meio da definição de distribuições de probabilidades associadas aos dados demográficos. No caso da geração de moradores para a população urbana domiciliada em apartamentos e a idades dos mesmos, foi utilizado o ajuste segundo a Tabela 3.

Tabela 3: Ajuste das distribuições de Weibull e Gamma a população urbana segundo dados do IBGE (2016).

	FUNÇÃO DE PROBABILIDADE	PARÂMETROS	KOLGOMOROV-SMIRNOV (KS)
Número de moradores por apartamento	Weibull	$\lambda = 1,584$	$KS\ p = 0,7821$
		$k = 35,831$	$KS\ estatística = 0,064$
Idade dos moradores	Gamma	$k = 4,096$	$KS\ p = 0,8284$
		$\theta = 0,637$	$KS\ estatística = 0,157$

- Parâmetros associados as características dos aparelhos associados

A construção do modelo é feita através do Matlab, um software de processamento de dados voltado para o cálculo numérico. A parametrização se dá através da revisão da bibliografia de dados estatísticos relacionados aos tipos de aparelhos hidrossanitários existentes, seus padrões de uso e consumo e informações associadas a dados demográficos.

A partir de uma revisão empírica da literatura, na Tabela 4 encontram-se as distribuições de probabilidade definidas por alguns autores para a região metropolitana de São Paulo.

Tabela 4: Padrão estatístico de uso por aparelho sanitário

	FREQUÊNCIA		DURAÇÃO		VAZÃO (L/S)	
	Distribuição	Parâmetro	Distribuição	Parâmetro	Distribuição	Parâmetro
Lavatório ¹	Poisson	$\lambda=5,93$	Lognormal	$\sigma=0,845$ $\mu=3,355$	Lognormal	$\sigma=0,328$ $\mu=-2,668$
Pia ²	Poisson	$\lambda=24,88$	Lognormal	$\sigma=0,785$ $\mu=3,176$	Weibull	$\lambda= 0,569$ $k= 1,587$
Chuveiro ¹	Poisson	$\lambda=1,08$	Gama	$k=6,522$ $\theta=0,767$	Lognormal	$\mu=-2.421$ $\sigma= 0,201$
Máquina ⁴	GEV	$k=0,249$ $\sigma=0,134$ $\mu=0,185$	6 Min/Ciclo		Uniforme	0,1
Bacia ³	Poisson	$\lambda=2,75$	Fixo	60s	Fixo	0,25L/s
Tanque ¹	Poisson	$\lambda=1,15$	Lognormal	$\sigma=0,892$ $\mu=3,291$	Lognormal	$\sigma=0,328$ $\mu=-0,349$

¹Distribuição segundo dados de Oliveira et. al (2013); ²Distribuição segundo dados de Ilha e Gonçalves (1981); ³Distribuição segundo dados de Oliveira et. al (2013), considerando uma bacia sanitária com caixa de 12L; ⁴Distribuição segundo dados do PROCEL INFO para a definição da frequência de uso e duração e vazão segundo dados de Oliveira et. al (2013).

Fonte: adaptado de Ferreira e Gonçalves (2019)

A frequência de uso de cada aparelho está associada a tipificação entre uso coletivo ou individual, conforme estabelecido por cada autor. Os usos individuais terão as distribuições de frequências associadas ao uso de cada morador, enquanto usos coletivos tem as distribuições associadas ao uso de todos os moradores do domicílio.

- Definição do horário do evento de demanda (τ)

A definição do horário de cada evento é determinada a partir do padrão de comportamento de cada morador do domicílio, a depender do tipo de uso. Primeiro, é definido o padrão de comportamento, também randomicamente, por meio da faixa etária do morador. Um exemplo é dado na Tabela 4 com a definição de 5 tipos de padrões comportamentais podendo variar de acordo com o parâmetro σ da distribuição normal. Para isso, a construção da Tabela 5 é realizada baseando-se nos seguintes trabalhos e pesquisas:

- Santos-Silva (2010) realizaram um estudo probabilístico e comparativo na Região Metropolitana de São Paulo das características de sono, como duração e horário de dormir da população por faixa etária;
- O tempo de deslocamento até o trabalho, segundo o censo do IBGE (2010), que é em média de 6 minutos a 1 hora no Brasil;
- O estudo realizado por Silva *et al.* (2005) acerca dos hábitos de sono e do horário de ir à escola das crianças brasileiras;
- A jornada média de trabalho de 8h diária;
- A taxa de desocupação brasileira segundo os dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD).

Assim, foram definidos 5 tipos de padrões comportamentais podendo variar de acordo com o parâmetro σ da distribuição normal.

Tabela 5: Padrão horário comportamental do usuário segundo distribuição normal por faixa etária

FAIXA ETÁRIA		ACORDAR	SAIR DE CASA	RETORNAR	DORMIR
Até os 17 anos (matutino 60%)	μ	6:00:00	07:30:00	12:30:00	22:30:00
	σ	01:00:00	00:30:00	00:30:00	01:00:00
Até os 17 anos (vespertino 40%)	μ	09:30:00	13:00:00	18:00:00	01:00:00
	σ	01:00:00	00:30:00	00:30:00	01:30:00
18 a 65 anos (75%)	μ	5:30:00	07:30:00	19:30:00	22:30:00
	σ	01:00:00	00:30:00	00:45:00	01:30:00
18 a 65 anos (25%)	μ	8:00:00	10:00:00	14:00:00	23:30:00
	σ	01:00:00	03:00:00	04:00:00	01:00:00
A partir dos 65 anos	μ	05:30:00	10:00:00	14:00:00	21:30:00
	σ	01:00:00	03:00:00	04:00:00	00:30:00

A probabilidade do horário de ocorrência de um evento de uso se associa com o padrão comportamental de seu morador através do estabelecimento de faixas horárias de **pico de demanda**, nas quais o uso de determinados aparelhos tem maior tendência de ocorrência. O horário de pico foi definido pelos autores como sendo de até 30min depois de acordar, nos 30 min antes de sair de casa, nos 30 min após retornar e nos 30 min antes de dormir.

Dentro do modelo desenvolvido cada aparelho tem uma probabilidade de horário de ocorrência, sendo que para o chuveiro, pia da cozinha, lavatório e bacia sanitária as probabilidades de uso correspondem a:

- Chuveiro: 15% de probabilidade 30min após acordar e antes de sair; 50% de probabilidade até 30min após retornar e 20% até 30 min antes de dormir.

- Pia da cozinha: 5% de probabilidade na madrugada; 25% de probabilidade entre o horário que acorda e o horário que sai de casa; 70% de probabilidade entre o horário que retorna e vai dormir.

- Lavatório: 10% de probabilidade de uso na madrugada; 15% de probabilidade de uso até 30min depois de acordar e 20% de probabilidade de uso até 30min antes de sair; 40% de probabilidade de uso depois que retorna à residência e 15% até 30min antes de dormir.

- Bacia sanitária: 5% de probabilidade de uso durante a madrugada; 13% de probabilidade de uso em cada faixa de horário compreendido no horário de pico da manhã e da noite; 10% de probabilidade no intervalo fora do horário de pico na faixa horária da manhã; 35% no intervalo fora do horário de pico compreendido entre o retorno para a residência e horário que o morador vai dormir.

No caso da máquina de lavar e no tanque, a probabilidade de uso é ajustada segundo os dados do PROSEL INFO para o uso de máquina de lavar, conforme Figura 5.

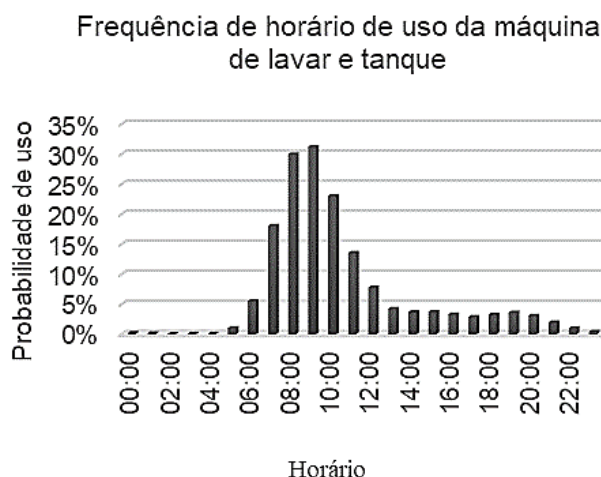


Figura 5: Probabilidade de horário de uso da MQL e do tanque, segundo dados do PROSEL INFO.

No modelo, para a frequência de ciclos da máquina de lavar no Brasil foi feito o ajuste a distribuição de probabilidade Generalizada de Valores Extremos (GEV) e a Gamma, segundo base de dados do PROCEL INFO, como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros da distribuição GEV para máquina de lavar

DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	GEV		LOG LOGÍSTICA	
	Frequência	Erro padrão	Horário	Erro padrão
PARÂMETROS	$k = 0,249$	$7,686 \times 10^{-3}$	$\sigma = 0,186$	$1,238 \times 10^{-3}$
	$\sigma = 0,134$	$1,112 \times 10^{-3}$		
	$\mu = 0,185$	$1,355 \times 10^{-3}$	$\mu = 10,453$	$2,480 \times 10^{-3}$

- Inserção de aparelhos eficientes

Para inserção de aparelhos eficientes, optou-se pelos aparelhos com maior utilização em horários de pico, como o chuveiro e a bacia sanitária.

Para a duração dos banhos, foi utilizada uma distribuição triangular com mínimo de 2 e máximo de 5 minutos/banho, levando em consideração que, segundo Moon (2015), a quantidade mínima de água necessária para um banho varia entre 1 e 3 minutos enquanto para a Sapesb a duração ideal de banhos é de 5 minutos.

Em relação a vazão dos chuveiros e dos modelos de chuveiros mais eficientes existentes no mercado, as vazões variam entre 3 e 5 L/min, segundo a base de dados da EPA, logo também é utilizado no modelo uma **distribuição triangular** com esses dados.

Para substituição da bacia sanitária, para este estudo foi considerada a substituição da bacia convencional de 12L de Oliveira et. al (2013), pela bacia sanitária Acquamantic do Brasil modelo Karoll, com acionamento de 2,0 L/descarga, por ser uma bacia sanitária mais compatível para o Brasil, tanto para aquisição quando para instalação.

- Análise do coeficiente de máxima vazão horária

A análise do coeficiente de máxima vazão horária é feita através da obtenção das vazões máximas e médias de cada simulação e, em seguida, é feita uma correlação com as equações empíricas utilizadas em outras regiões de estudo a partir da utilização de métodos matemáticos de ajuste, como o método de mínimos quadrados.

RESULTADOS OBTIDOS

Para se obter os dados de vazões máximas e mínimas e o consumo per capita e por aparelho das simulações em diferentes populações, o *input* inicial do modelo foi a quantidade de domicílios analisados. Assim, foram feitas análises distintas de 50 a 50 mil unidades domiciliares. Na Figura 6 é exposto o primeiro resultado, que sintetiza na forma de *boxplot* o consumo *per capita* em 50, 500, 5000 e 50000 domicílios.

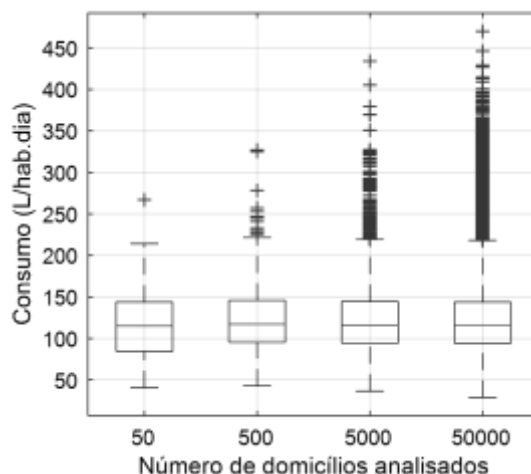


Figura 6: Consumo *per capita* em diferentes agrupamentos populacionais

A partir das características demográficas e do consumo de cada domicílio é possível se estabelecer uma relação entre o consumo per capita e a taxa de ocupação e uma relação entre a taxa de ocupação e o consumo mensal de cada residência, a fim de obter-se a expressão que melhor representa essas relações. Nas figuras 7-a) e 7-b) são apresentados os resultados de consumo per capita por ocupação juntamente com os resultados encontrados por Cohim et. al (2012).

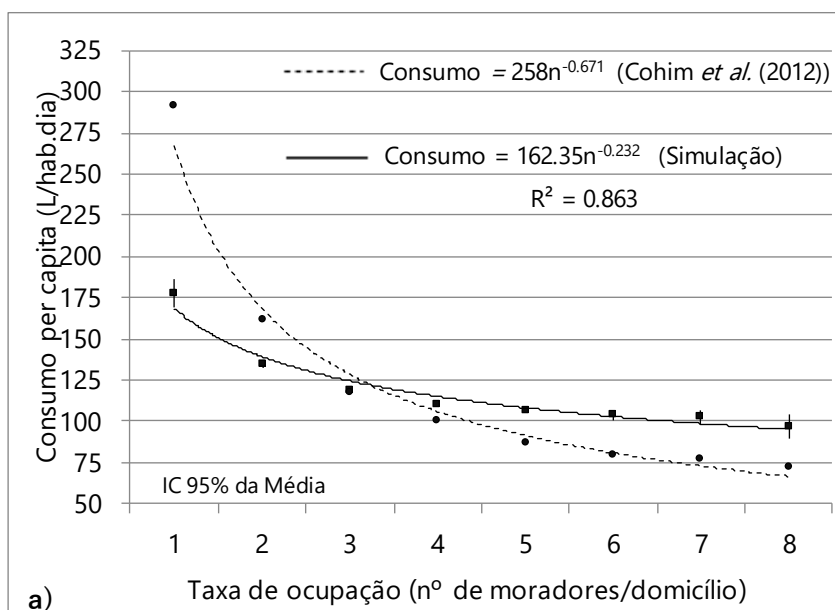


Figura 7: a) Relação entre o consumo *per capita* médio e número de moradores da simulação de 5000 domicílios com ajuste a função exponencial e intervalo de confiança de 95%;

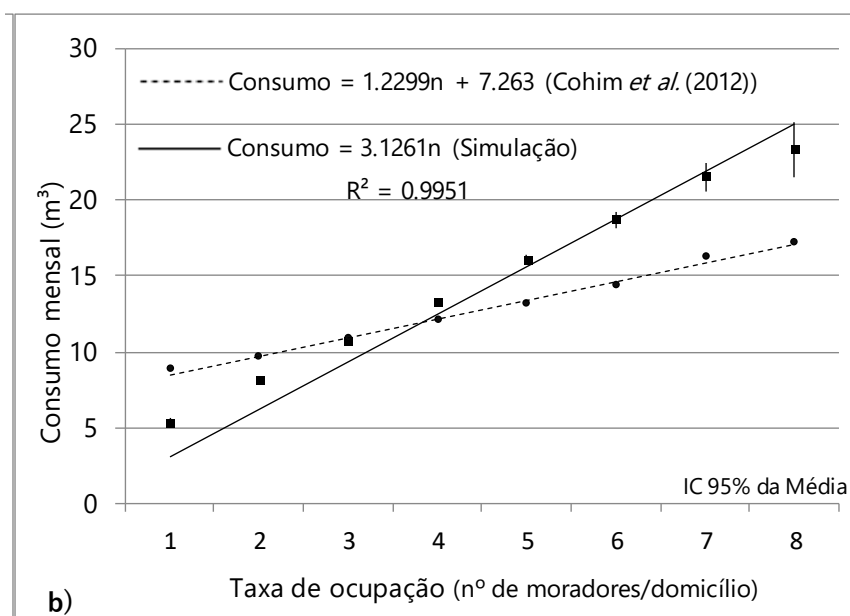


Figura 7: b) Relação entre o consumo residencial médio e número de moradores da simulação de 5000 domicílios com regressão linear e intervalo de confiança de 95%.

Na Figura 8, são apresentados hidrogramas para diferentes populações, representado pelo número de domicílios. Eles refletem o padrão comportamental da Tabela 2, com o aumento da demanda nos horários com maior concentração de pessoas no interior do domicílio, com picos de demanda na manhã e na noite.

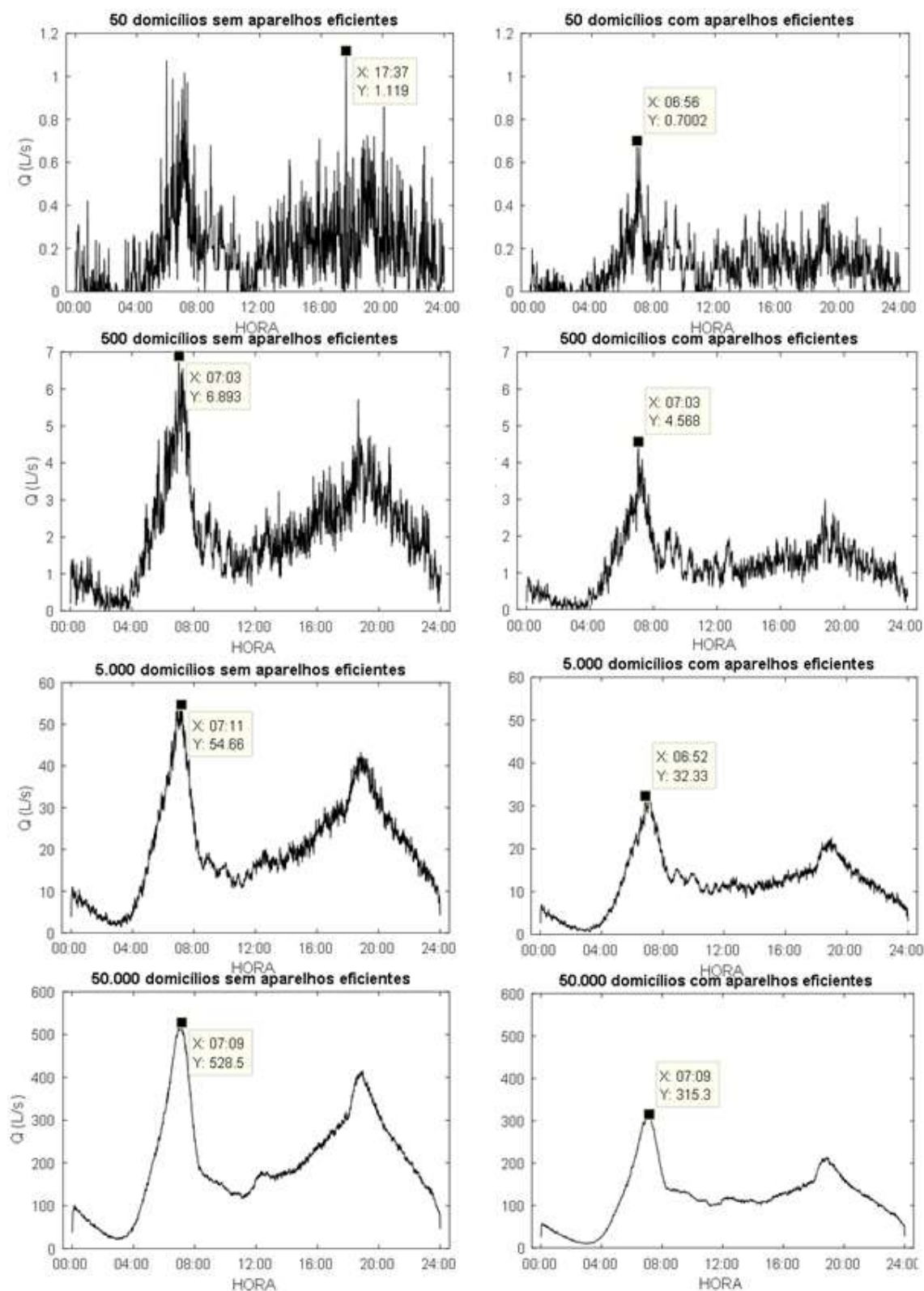


Figura 8: Vazão Q (L/s) por amostra de domicílios.

A obtenção de hidrogramas gerados pelo consumo de cada uso final permite uma análise de sua forma pela substituição dos aparelhos sem que houvesse mudança nos hábitos dos moradores e sua influência na obtenção de parâmetros de dimensionamento, como o K₂, também denominado como fator de pico, que é relevante para o dimensionamento de redes de abastecimento de água e de esgoto.

Na Figura 8, coeficiente K₂ que é a relação entre a máxima vazão horária e a vazão média do maior dia de consumo, utilizado para determinação da demanda de água para dimensionamento do SAA, variou conforme o tamanho das amostras, podendo-se estabelecer uma relação com uma curva exponencial.

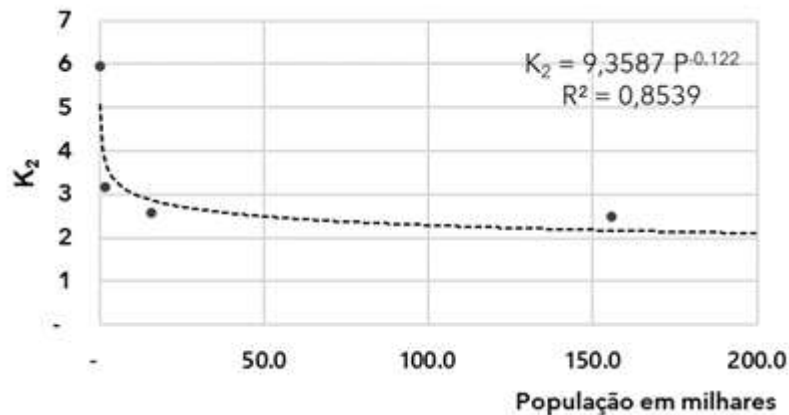


Figura 9: relação entre o coeficiente K₂ e população.

Uma outra avaliação do impacto da substituição por aparelhos economizadores também pode ser expressa em forma de gráfico, representado nas Figuras 10-a), 10-b) e 10-c).

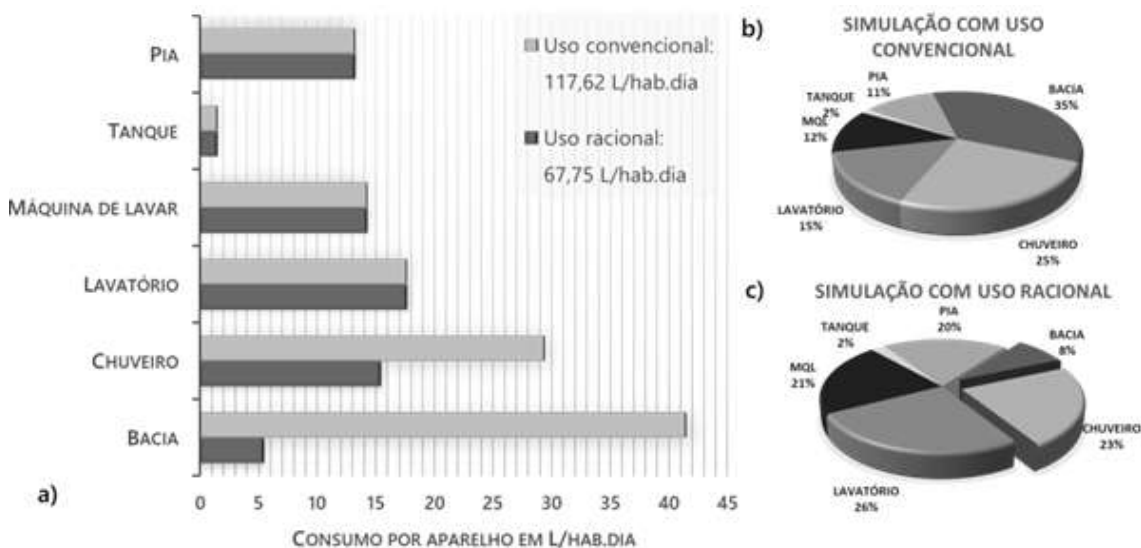


Figura 10- a) consumo em L/hab.dia por uso final para 5000 habitações. 10 - b) e c) percentagem de consumo por aparelho sanitário para 5000 domicílios.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No que concerne ao consumo *per capita*, a média das simulações variaram de 115,21 a 127,68 L/hab.dia, tendo o conjunto de dados representados na Figura 6, pelos diagramas de caixa para cada tamanho de população simulada. Nele, observa-se que os valores do consumo *per capita* são da mesma ordem de grandeza que os valores encontrados por outros autores para apartamentos, como, 148,06 L/hab.dia por Cominatos et. al (2022),

140,3 L/hab.dia por Costa e Mota (2022), 150,8 L/hab.dia por Cohim et. al (2012), 123,1 L/hab.dia por Botelho (2013), 144,5 L/hab.dia por Sant'ana et al. (2017). e demais autores da Tabela 1. Vale ressaltar que esses resultados encontrados por outros autores foram obtidos por pequenas amostras, enquanto os valores do SNIS são valores que representam a leitura do hidrômetro macromedido, sendo ele também se deve a não consideração de demais usos como rega de plantas, lavagem de carro entre outros usos externos, indeterminados e vazamentos.

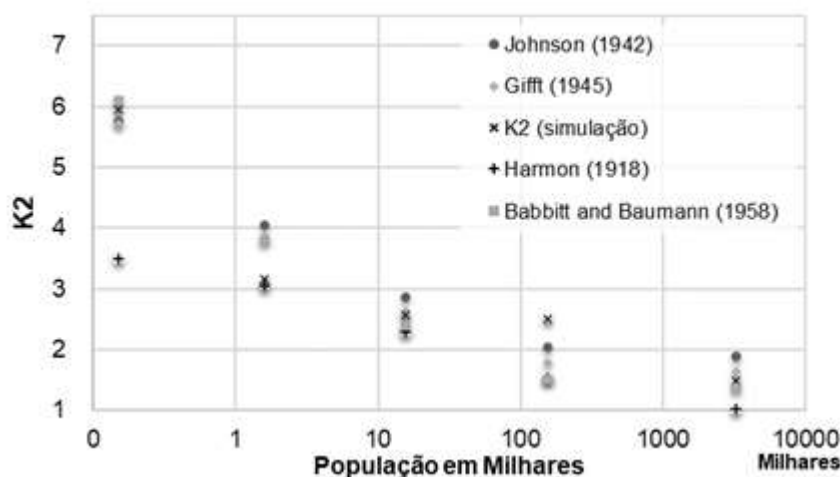
À medida em que a taxa de ocupação aumenta (Figura 7b), há também um aumento do consumo médio residencial, entretanto o consumo per capita segue uma ordem inversa em relação a taxa de ocupação, podendo-se realizar um ajuste a uma função exponencial (Figura 7a). Esse padrão de redução de consumo relacionado ao número de moradores também foi apontado por outros autores, tais como Cohim et. al (2012), Botelho (2013). Isso ocorre porque quanto maior o número de moradores, os consumos feitos para uso coletivo na residência, tais como, lavar roupas, cozinhar, lavar louças, são divididos entre um maior número de moradores, reduzindo, portanto, o consumo per capita.

Ao analisar os hidrogramas da Figura 8, pode-se realizar considerações importantes acerca do formato do mesmo em relação ao tamanho da população analisada que se suaviza à medida que se aumentam a quantidade de domicílios simulados e que também a inserção de aparelhos eficientes resultou na atenuação de picos de demanda. Essa constatação da diminuição de picos de demanda através da observância dos hidrogramas enfatiza que a substituição de aparelhos com grande tendência de usos em horários em que ocorram muitos usos simultâneos, devido a concentração de pessoas na residência, é uma ótima estratégia para diminuir estresses hídricos e falhas de abastecimento.

Na Figura 9, o coeficiente K_2 apresenta em todos os cenários populacionais uma relação inversa ao tamanho das amostras, mas com tendência de estabilização em grandes agrupamentos populacionais, tal que com um ajuste de uma função exponencial, a partir de 3,2 milhões de habitantes o valor de K_2 se igualaria a 1,5. Ou seja, segundo a projeção dos dados do modelo, o valor de K_2 só se igualaria ao disposto na NBR 9649 (ABNT, 1986) na qual é fixado em 1,5, numa população de 3,2 milhões de habitantes.

A variação do fator de pico, que representa a multiplicação entre K_1 e K_2 , e seu decréscimo em relação ao tamanho da população também já foram apontados por outros autores ao investigar os efeitos do tamanho da população na demanda de água. Ao comparar o valor obtido do coeficiente K_2 com as demais equações empíricas da literatura para amostras populacionais de mesmo tamanho, como mostrado na Figura 11, vemos que os resultados da simulação seguem um padrão semelhante aos desses autores.

Figura 11: Comparativo do valor do K_2 da simulação com pelo determinado por equações empíricas.



A desconsideração da variação do fator K_2 a pequenas populações, tal qual o disposto na NBR 9646 (1986), repercute também na definição da vazão de abastecimento e, consequentemente, no dimensionamento da rede de abastecimento. Ao utilizar o K_2 de 1,5, como orientado pela NBR 9646, na população simulada acarretaria o

subdimensionamento da vazão de abastecimento, como disposto na Tabela 8, podendo ter como consequência falhas na rede de abastecimento da população de estudo.

Tabela 7: Ajuste dos fatores de pico simulados a equação de Babbitt e Baumann

	Equação original	Ajuste com dados simulados (Assumindo $K_1=1,2$)	$E = (K_2' - K_2'')^2$
Babbitt e Baumann (1958)	$K_1 \times K_2 = \frac{5}{\frac{Pop.^{0,2}}{1000}}$	$K_1 \times K_2 = \frac{5,54}{\frac{Pop.^{0,19}}{1000}}$	1,08
Harmom (1918)	$K_1 \times K_2 = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{p}}$	$K_1 \times K_2 = 2,27 + \frac{2,87}{0,09 + \sqrt{p}}$	0,53
Giffit (1945)	$K_1 \times K_2 = \frac{14}{p^{0,1667}}$	$K_1 \times K_2 = \frac{20,36}{p^{0,1885}}$	1,08
Johnsson (1942)	$K_1 \times K_2 = \frac{5,2}{p^{0,15}}$	$K_1 \times K_2 = \frac{20,36}{p^{0,1885}}$	1,08

Tabela 8: Comparação vazão de abastecimento com K_2 simulado e teórico

$Q = K_1 \times K_2 \times \frac{Pop \times q}{86400}$ Obs.1: Para q (consumo per capita) = 150 L/hab.dia Obs.2: Amostra com 50.000 domicílios e taxa de ocupação de 3,12 Obs.3: $K_1 = 1,2$ (NBR 9649)		
	NBR 9649	Simulação
K_2	1,5	2,52
Q (L/s)	487,5	1.023,75

Ao analisar o consumo per capita por aparelho hidrossanitário (Figura 10-a) e comparar com resultados de outros autores expostos na Tabela 1, onde determinaram o consumo per capita por aparelho em diferentes regiões, percebe-se que por mais que existam variações nas regiões de estudo, não existe um consenso determinante na literatura para o consumo de cada aparelho hidrossanitário. E, além disso, os valores de consumo per capita por aparelho simulados encontram-se dentro da margem do que foi encontrado nas diversas regiões de estudo.

Já em relação a intervenção de aparelhos economizadores, é importante ressaltar que não houve alteração nos hábitos de consumo, nem na rotina dos usuários, o que dá maior confiabilidade na previsão do impacto do uso deles. Também vemos que como a bacia sanitária e o chuveiro possuem maior peso no consumo da residência, conforme a Figura 10-a) e como já demonstrado por outros pesquisadores na Tabela 1, a substituição da bacia sanitária e do chuveiro por aparelhos mais eficientes resulta numa nova distribuição dos percentuais de consumo por aparelho (Figura 10-b) e numa economia de até 40% em relação ao consumo total nessas habitações.

CONCLUSÕES

O modelo criado atua como uma ferramenta com bom potencial de uso para dimensionamento dos SAA's, capaz de caracterizar a demanda dos microcomponentes em diferentes agrupamentos populacionais e com a possibilidade de criar séries históricas de acordo com as características populacionais de entrada no modelo.

Assim, a partir de seu uso é possível obter características de suma importância para o dimensionamento e operação de redes de abastecimento, como vazões máximas, médias e mínimas, horários de pico, consumo per capita, consumo por aparelho, entre outros.

Os resultados apresentados pelo modelo encontram-se dentro da margem já apresentada na literatura para a mesma região de estudo, bem como não destoam do apresentado nas demais regiões brasileiras. Nele nota-se

que a aplicação de medidas de gestão da demanda de forma hierárquica nos aparelhos com maior potencial de uso em horários de pico, que seriam os aparelhos de dentro do banheiro, como lavatório, bacia sanitária e chuveiro, uniformizam a demanda e, por conseguinte, atenuam eventos de sobrecargas no SAA, tal que uso eficiente do chuveiro e bacia sanitária reduziu cerca de 40% do consumo total.

A partir da comparação com resultados de diferentes amostras coletadas pelos autores aqui citados que se infere a qualidade dos produtos de análise gerados pelo modelo, se mostrando útil não só na gestão dos sistemas de abastecimento de água, mas também se mostra como uma ferramenta com grande potencial para avaliação do impacto desses lançamentos no sistema de esgotamento sanitário e de avaliação da gestão da demanda como um todo.

As simulações realizadas pelo programa reforçam que o dimensionamento de redes de abastecimento e esgotamento sanitário com o valor fixado na NBR 9646 (ABNT, 1986) em pequenas populações induzem o subdimensionamento de redes e da vazão de projeto.

Para uma análise mais apurada de cada cenário deve-se considerar mais iterações, períodos mais longos, mais usos e cenários distintos, assim como a influência do gênero nas variáveis de consumo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABU-BAKAR, Halidu; WILLIAMS, Leon; HALLETT, Stephen Henry. A review of household water demand management and consumption measurement. *Journal of Cleaner Production*, p. 125872, 2021.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986. 7 p.
3. BABBITT, H. E.; BAUMANN, E. R. (1958). *Sewerage and sewage treatment* (8th ed.) (p. 790). New York: John Wiley & Sons. Inc
4. BARRETO, Douglas. Perfil do consumo residencial e usos finais da água. *Ambiente Construído*, v. 8, n. 2, p. 23-40, 2008. Disponível em: < <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/download/5358/3280>>
5. BARRETO, D.; MEDEIROS, O. Caracterização da vazão e frequência de uso de aparelhos sanitários. *Ambiente Construído*, v. 8, n. 4, p. 137-149, 2008. Disponível em: <seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/download/5939/4713>.
6. BOTELHO, Gabriella Laura Peixoto. Avaliação do consumo de água em domicílios: fatores intervenientes e metodologia para setorização dos usos. 2013.
7. BUCHBERGER, S. G.; WU, L. Model for Instantaneous Residential Water Demands. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 121, n. 3, p. 232-246, mar 1995. ISSN 0733-9429. Disponível em:
8. BLOKKER, E. J. M., VREEBURG, J. H. G., AND VAN DIJK, J. C. (2010). "Simulating residential water demand with a stochastic end-use model." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000002, 19-26.
9. 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.
10. COMINATO, C., SBORZ, J., KALBUSCH, A., & HENNING, E. Water demand profile before and during COVID-19 pandemic in a Brazilian social housing complex. *Heliyon*, p. e10307, 2022.
11. COHIM, E.; GARCIA, A. ; KIPERSTOK. Caracterização do consumo de água em condomínios para população de baixa renda: estudo de caso In: CONGRESO INTERAMERICANO AIDIS, 31. Santiago, Chile. 2008
12. COHIM, E.; MEIRELES, A.; SILVA, S. R. DOS S. Taxa de ocupação e o consumo per capita. In: XV Silubesa – Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte. 2012
13. COSTA, T.H.S; MOTA, F.S.B. Análise quantitativa de águas cinza em um condomínio residencial. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 27, p. 413-421, 2022.
14. FERREIRA, T. D. V., & GONCALVES, O. M. (2019). Stochastic simulation model of water demand in residential buildings. *Building Services Engineering Research and Technology*, 0143624419896248
15. GATO-TRINIDAD S., & GAN K. (2014). Understanding peak demand factors for water and wastewater supply system design. pp. 2-8.
16. GIFFT, H. M. Estimating variations in domestic sewage flows. *Water Works Sewage*, v. 92, p. 175-177, 1945.

17. GIURCO, D. et al. Residential end-use measurement Guidebook: a guide to study design, sampling and technology. 2008.
18. GHALEHKhONDABI, I., ARDJMAND, E., YONG II, W. A. & WEECKMAN, G. R. (2017) Water demand forecasting: review of soft computing methods. *Environmental Monitoring and Assessment* 189–313. doi:10.1007/s10661-017-6030-3.
19. HARMON, W. Forecasting sewage at Toledo under dry weather conditions. *Engineering News Record*, v. 80, p. 1233, 1918.
20. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. : Sinopse do censo demográfico. Rio de Janeiro, 2011. 261 p.
21. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2018). Pesquisa Nacional por Amostra em Domicílio Contínua, 2012-2018.
22. ILHA, M. S. d. O.; GONÇALVES, O. M. Estudos de parâmetros relacionados com a utilização de água quente em edifícios residenciais. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*, v. 38, 1991.
23. JOHNSON, C. F. Relation between average and extreme sewage flow rates. *Engineering News Record*, v. 129, p. 500–501, 1942.
24. MOON, L. 2015. How often should we shower? Much less often than you think. [online] *The Sydney Morning Herald*. Disponível em: <https://www.smh.com.au/lifestyle/beauty/how-often-should-we-shower-much-less-often-than-you-think-20150310-140487.html>. Acesso: 4 Abril. 2020.
25. OLIVEIRA, L. H. de et al. Modelling of water demand in building supply systems using fuzzy logic. *Building Services Engineering Research and Technology*, v. 34, n. 2, p. 145–163, may 2013. ISSN 0143-6244. Disponível em: <<http://bse.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0143624411429381>>
26. PROCEL, INFO. Disponível em: www.procelinfo.com.br. Acesso em, v. 10, 2021.
27. SAPESB/IPT. Guia para parametrização do consumo de água na Região Metropolitana de São Paulo. Relatório Técnico. São Paulo, 2002.
28. SANTOS-SILVA, R.; BITTENCOURT, L. R. A.; PIRES, M. L. N.; DE MELLO, M. T.; TADDEI, J. A.; BENEDITO-SILVA, A. A.; POMPEIA, C.; TUFIK, S. Increasing trends of sleep complaints in the city of São Paulo, Brazil. *Sleep medicine*, v. 11, n. 6, p. 520-524, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sleep.2009.12.011>>. Acesso em: 20 jan. 2022.
29. SILVA, T. A.; CARVALHO, L. B., SILVA, L.; MEDEIROS, M.; NATALE, V. B.; CARVALHO, J. E.; PRADO, L. B. F.; PRADO, G. F. Sleep habits and starting time to school in Brazilian children. *Arquivos de Neuro-psiquiatria*, v. 63, n. 2b, p. 402-406, 2005.
30. STEC, A. Demand for Water in the Building. *Sustainable Water Management in Buildings*. Water Science and Technology Library, v. 90, p. 21-32, 2019.
31. U.S Environmental Protection Agency (EPA). Watersense Products. Disponível em: <https://www.epa.gov/watersense/showerheads/>. Acesso em 15 de julho, 2022.