

XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

USO DE MODELAGEM ESTOCÁSTICA PARA AVALIAR O IMPACTO DA GESTÃO DA DEMANDA

Vanessa Silva Santos¹; Bruna Katarina Pereira de Azevedo²; Anderson de S. M. Gadéa³ & Eduardo Cohim⁴

RESUMO – Um modelo preditivo de demanda de água residencial foi desenvolvido a partir de uma abordagem estocástica ao consumo de cinco aparelhos sanitários em uma residência com o passo de 1s, o que se traduz na soma de todas as micro contribuições do sistema, a fim de obter o total instantâneo demanda da unidade familiar. O modelo foi calibrado por meio de uma revisão bibliográfica dos dados estatísticos dos usuários e usos finais de uma residência individual, como padrão comportamental do residente, ocorrência de eventos de demanda e especificações dos dispositivos sanitários. A demanda instantânea é alcançada sobrepondo pulsos de intensidade constante e tempos de chegada e duração variáveis. Como primeiro resultado, temos a caracterização do consumo das famílias, total e por dispositivo hidráulico, em pequenas e grandes populações e, como segundo resultado, temos a concatenação do consumo total e setorizado de água com uso racional. O uso eficiente da bacia sanitária, torneira e chuveiro resultaram numa economia da ordem dos 40%. O modelo pode ser aplicado como cenários de estudo para o design de redes de suprimentos, além de permitir a análise da influência de medidas de gerenciamento de demanda, por meio de simulações.

ABSTRACT– A predictive model of residential water demand was developed from a stochastic approach to the consumption of five sanitary appliances in a residence in the magnitude of 1s, which translates into the sum of all the micro contributions of the system, in order to obtain the total instant demand of the family unit. The model was calibrated through a bibliographic review of users' statistical data and end uses of an individual dwelling, such as the resident's behavioural pattern, occurrence of demand events and specifications of the sanitary devices. Instant demand is achieved by superimposing pulses of constant intensity and varying arrival times and duration. As a first result,

1) Graduanda de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Feira de Santana; e-mail: silvasantos.vanessa@hotmail.com

2) Graduanda de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Feira de Santana.; e-mail: brunakatarina14@gmail.com

3) Professor Titular da UEFS, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Engenharia Ambiental.; e-mail: gadea@uefs.br.

4) Professor Titular da UEFS, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Engenharia Ambiental.; e-mail: edcohim@gmail.com.

we have the characterization of household consumption, total and by hydraulic device, in the short and large population and as a second result we have the concatenation of total and sectorized water consumption with rational use, in different periods and when applying more efficient fixtures. The efficient use of wc, toilet tap and shower results in savings of around 40%. The model can be applied as study scenarios for the design of supply networks, as well as allowing the analysis of the influence of demand management measures, through simulations.

Palavras-Chave – simulação estocástica residencial; gerenciamento da demanda de água; modelagem.

INTRODUÇÃO

No ambiente doméstico/familiar, o controle do desperdício da água e seu uso racional requerem revisão de hábitos e proposição de novos padrões de consumo, não só dos variados bens e serviços, mas, sobretudo, da água, conforme Feital (2008).

Devido à importância da caracterização da demanda hídrica e suas projeções futuras, muitos pesquisadores têm se voltado a estudar o tema, pois segundo Ghalehkhondabi *et al.* (2017) o número de artigos publicados cresceu exponencialmente nos últimos 20 anos. O aumento no número de publicações é um provável reflexo da intensificação da escassez dos recursos hídricos junto a valorização da gestão da demanda.

A instalação de medidores e registradores para a caracterização e quantificação do consumo residencial em cada ponto de consumo é uma alternativa necessária, porém, fatores como a operacionalidade e o custo associado promovem a utilização de outras metodologias, dentre elas, a modelagem computacional da demanda.

Modelos estocásticos utilizando distribuições de probabilidade associadas as características de vazão, duração e intensidade de aparelhos sanitários e características comportamentais da população de estudo já foi o objeto de estudo de alguns autores. Blokker *et al.* (2010) utilizou dados estatísticos de pesquisas de companhias de fornecimento de água da Holanda de 3200 residências em 2001 e definiu as distribuições de probabilidade para habitações em Ohio, EUA, através dos dados de consumo de água de 21 residências. Ferreira e Gonçalves (2020) também criaram um modelo preditivo e obtiveram as funções de probabilidade e os parâmetros de vazão, frequência e duração a partir dos trabalhos de Ilha e Gonçalves (1991), Barreto e Medeiros (2008) e Oliveira *et al.* (2013), nos quais a área de estudo de ambos foi no município de São Paulo.

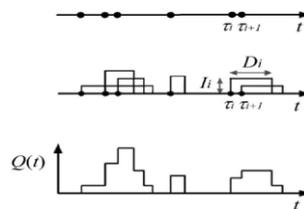
OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo modelar o consumo total de água e o consumo por dispositivo hidráulico intradomiciliar de agrupamentos populacionais, com base na metodologia de superposição de pulsos retangulares, com aplicações no impacto de medidas de gestão da demanda e melhoria da eficiência de Sistemas de Abastecimento de Água (SAA).

METODOLOGIA

Para a realização do estudo proposto foi criado um modelo estocástico na linguagem de programação MATLAB. A estrutura do modelo criado é similar ao SIMDEUM, desenvolvido por Blokker *et al.* (2010). Assim como no 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 1, a demanda de uso de um usuário ‘j’ em um determinado aparelho num tempo ‘ τ_i ’ é associada a um pulso aleatório de duração ‘ D_i ’ e de intensidade ‘ I_i ’. Por fim a demanda total Q é obtida através da soma de todos os pulsos retangulares de todos aparelhos, tal qual a Equação 1, onde k é o índice de contagem de todos usos finais de 1 a M , j o índice dos usuários e i o índice que contabiliza todos eventos de uso de todos aparelhos e usuários.

Figura 1: Metodologia de mensuração do consumo utilizada no SIMDEUM.



Fonte: Blokker *et al.* (2010)

A intensidade do evento de demanda é fixada durante o período D_{ijk} , sendo igual a zero no restante do tempo, como mostrado na Equação 2.

$$Q = \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{F_{jk}} B(I_{ijk}, D_{ijk}, \tau_{ijk}) \quad (1)$$

$$B(I_{ijk}, D_{ijk}, \tau_{ijk}) = \begin{cases} I_{ijk} & \tau_{ijk} < \tau < \tau_{ijk} + D_{ijk} \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases} \quad (2)$$

Neste trabalho foi analisado a demanda e consumo de água residencial por domicílio, considerando-se os usos e as distribuições de probabilidades obtidas por Ferreira e Gonçalves (2020), descritas na Tabela 1.

Conforme Ferreira e Gonçalves (2020), os usos da pia da cozinha, do tanque e máquina de lavar são classificados como usos coletivos e, dito isso, suas frequências de uso se associam ao uso de todos os moradores, ou seja, são estimados por domicílio.

Tabela 1: Padrão estatístico de uso por aparelho sanitário

	Frequência		Duração		Vazão (L/S)	
	Distribuição	Parâmetro	Distribuição	Parâmetro	Distribuição	Parâmetro
Lavatório	Poisson	$\lambda = 5.93$	Lognormal	$\sigma = 0.8449$ $\mu = 3.3551$;	Lognormal	$\sigma = 0.3275$; $\mu = -2.667$;
Pia da Cozinha	Poisson	$\lambda = 24.88$	Lognormal	$\sigma = 0.785$; $\mu = 3.1763$;	Weibull	$\lambda = 0.569$ $k = 1.5871$
Chuveiro	Poisson	$\lambda = 1.08$	Gama	$k = 6.5216$ $\theta = 0.7668$	Lognormal	$\mu = -2.4205$ $\sigma = 0.2014$
MQL	-	-	6 Min/Ciclo		Uniforme	0.1
Bacia Sanitária (12L)	Poisson	$\lambda = 2,75$	Fixo	60s	Fixa	0,25L/s
Tanque	Poisson	$\lambda = 1,15$	Lognormal	$\sigma = 0,8918$; $\mu = 3,2905$;	Lognormal	$\sigma = 0.3279$; $\mu = -.3485$;

Fonte: Adaptado de Ferreira e Gonçalves (2020)

Para a frequência de ciclos da máquina de lavar no Brasil é adotada a distribuição Poisson, com $\lambda = 0.37$, mesma dos encontrados por Blokker *et al.* (2010), segundo dados dos EUA.

A probabilidade do horário de ocorrência de um evento de uso varia de acordo com o padrão comportamental de seu morador, sendo o horário de pico de demanda 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, tal que:

- A probabilidade de uso do chuveiro e do lavatório no horário de pico é de 100%, da bacia sanitária é de 50% e da máquina de lavar é 0%, em concordância com probabilidade do SIMDEUM de Blokker *et al.* (2010).

- Durante a madrugada a probabilidade de uso da bacia sanitária e demais usos, excetuando a máquina de lavar roupas é 5%.
- Os eventos de uso do tanque e da máquina de lavar roupas acontecem durante o dia, fora do horário de pico de demanda e uma vez na semana.

Os parâmetros das distribuições de probabilidade das amostras populacionais por domicílio do tipo apartamento na região urbana e a idade da população urbana foram definidos segundo dados do IBGE (2011), conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros da distribuição normal para região urbana

	Número de moradores por apartamento	Idade
Parâmetros	$\mu = 2.60736$	$\mu = 32,0208$
	$\sigma = 1.27454$	$\sigma = 20,2051$
R^2	94,78%	82,91%
RMSE	0,0252	0,0029

Fonte: Adaptado de IBGE (2011)

Para introdução de aparelhos e usos mais eficientes no modelo foram considerados os usos da bacia sanitária, chuveiro e torneiras do lavatório e da cozinha. No Brasil uma das bacias sanitárias mais econômicas disponíveis no mercado brasileiro possui acionamento único e consumo de 2L. Quanto ao chuveiro, a WHO (2013) recomenda que a duração mínima do banho seja de 5min e há dispositivos no mercado com vazões de até 3L/min

- Cenário 1 (C1): Habitação brasileira na zona urbana segundo modelo de Ferreira e Gonçalves (2020);
- Cenário 2 (C2): Habitação brasileira na zona urbana com: bacia sanitária com vazão fixa de 0,4L/s e duração fixa de 5s; chuveiro com vazão fixa em 3L/min e duração fixa de 5min; lavatório com restritor de vazão de 2L/min;

Para analisar os dois cenários, foi simulada a demanda de cada um por 24h de um dia útil para usuários com o padrão comportamental estimado com base nas experiências dos autores, conforme Tabela 4.

Tabela 4: Padrão horário comportamental do usuário segundo distribuição normal por faixa etária

	Acordar	Sair de casa	Retornar	Dormir
μ	5:30:00	07:30:00	19:30:00	22:30:00

18 a 65 anos (75%)	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
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
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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o padrão comportamental foram simulados os eventos de demanda para 50, 500 e 5000 domicílios por hora, conforme a Figura 3 e Tabela 5, detalhando o consumo por amostra populacional e tipo de aparelho e sinalizando os picos de demanda nos períodos diurno e noturno.

Em todos os cenários o consumo por aparelho e por amostra não variou linearmente com a quantidade de domicílios, tal fato deve-se a estocasticidade do modelo, o que lhe confere a possibilidade de avaliação de cenários distintos.

Conforme a Figura 3, há uma concentração de picos de demanda na faixa horária da manhã e da noite, tais eventos se associam ao padrão comportamental inserido no modelo. Contudo, ainda que o intervalo etário tenha uma influência direta no comportamento horário dos eventos, ele não influi nos parâmetros de consumo, ou seja, os aparelhos ainda obedecem aos padrões da Tabela 4 sem considerar, por exemplo, os casos em que o período dentro de casa é prolongado, devido à falta de estudos que considerem a correlação dos parâmetros de consumo com variáveis como gênero, idade e tempo no interior da habitação.

Em C2, foram utilizados aparelhos mais eficientes e, como resultado, foi observado que o consumo de água teve uma redução de 40% quando comparado ao obtido nas amostras de C1, além da redução nos picos de demanda. Logo, é demonstrado que o uso eficiente em aparelhos com maior potencial de demanda nos horários de pico pode diminuir eventos de sobrecarga no SAA.

Para análise da confiabilidade pode-se comparar o consumo médio per capita do primeiro cenário (Tabela 6), em que os parâmetros foram obtidos por estudos na cidade de São Paulo, com

demais estudos. Barreto (2008) obteve 152.7 L/dia/hab. e Rocha e Barreto (1999) 109 L/dia/hab. para os mesmos usos na cidade de São Paulo, em apartamentos.

Figura 3: Vazão (Q) em L/s por hora, cenários C1 e C2.

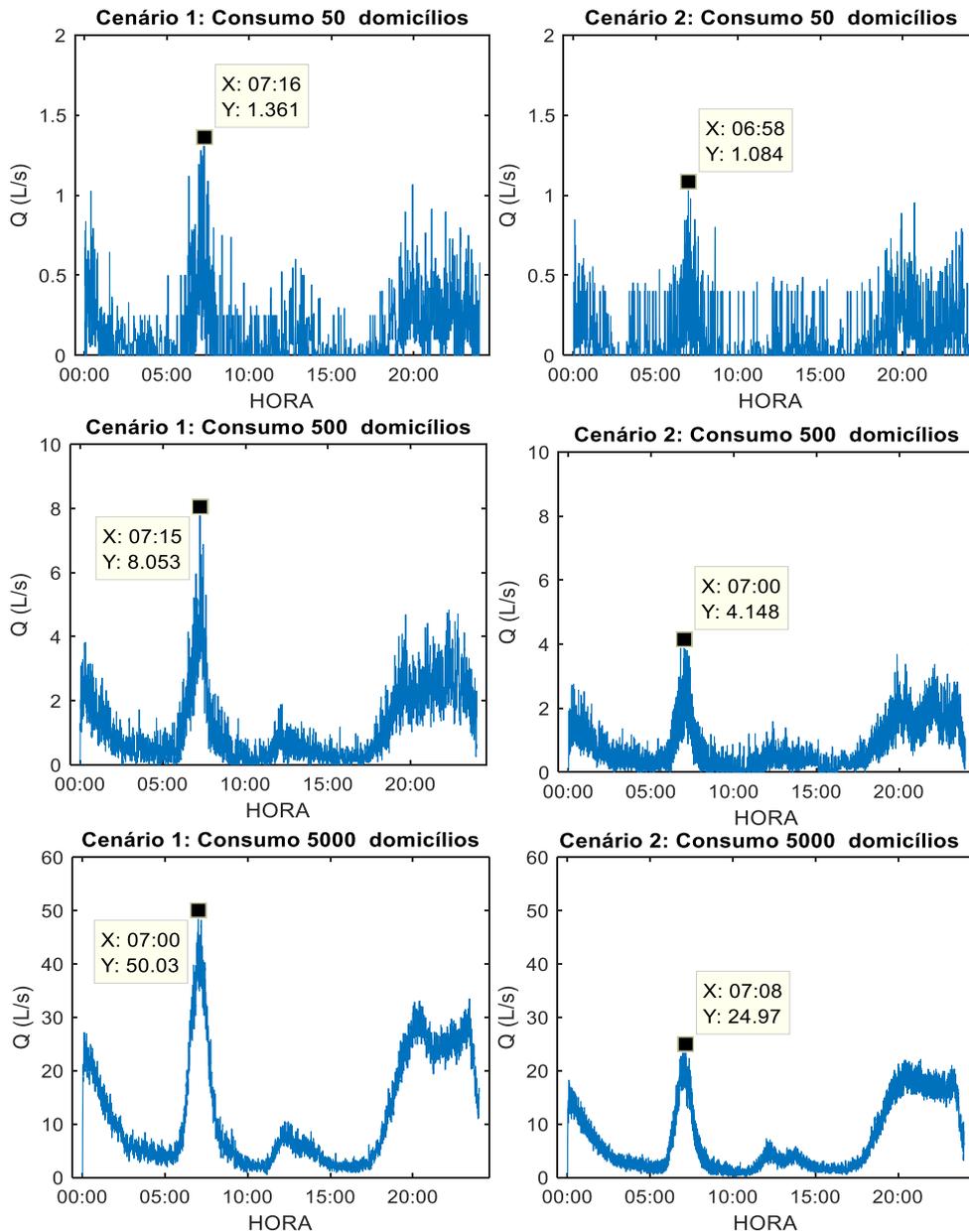


Tabela 5: Consumo total por aparelho e número de domicílios cenários C1 e C2.

Cenário 1

	B. S.(12L)	Lavatório	Chuveiro	Pia	Tanque	MQL	Total C1
50	7,485	2,988	5,273	1,981	257	1,728	19,712
500	67,02	28,547	45,775	20,744	2,233	22,032	186,351

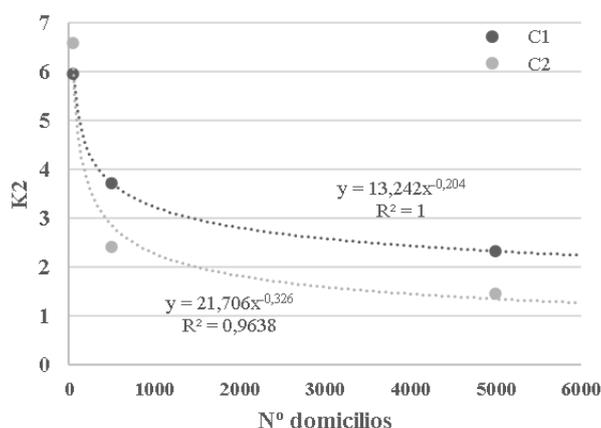
5000	656,415	281,67	463,84	205,37	23,131	221,616	1,852,042
Cenário 2							
	B. S.(2L)	Lavatório	Chuveiro	Pia	Tanque	MQL	Total C2
50	860	2,925	2,85	2,029	179	2,16	11,003
500	8,818	28,438	25,485	20,536	2,26	21,744	107,281
5000	86,682	282,82	255,6	207,52	22,719	220,464	1,075,805

Tabela 6: Consumo médio em L/dia/hab. por amostra populacional nos cenários C1 e C2.

Cenários	Número de domicílios		
	50	500	5000
C2	85	83	83
C1	152	143	142

A partir das simulações criadas também é possível obter coeficientes multiplicadores de demanda, como o K2. O 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, diferente do disposto na NBR 9649 (1986) em que o valor é fixado em 1,5. Conforme a Figura 4, o coeficiente apresenta em ambos cenários uma relação inversa ao tamanho das amostras, mas com tendência de estabilização em grandes agrupamentos populacionais.

Figura 4: Coeficiente K2 por amostra cenários C1 e C2.



CONCLUSÃO

A caracterização da demanda é fundamental para a utilização adequada de recursos financeiros nos sistemas de abastecimentos, logo sua análise e diagnósticos devem ser realizados continuamente. A aplicação de aparelhos eficientes é um dos pilares para melhor gestão da demanda e melhor aproveitamento dos recursos hídricos.

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 com resultados dentro da margem encontrada na literatura para a mesma região de estudo, além de poder calcular coeficientes multiplicadores de demanda utilizados em projetos de abastecimento de água e de esgoto sanitário. 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 uniformiza a demanda e, por conseguinte, atenua eventos de sobrecargas no SAA, tal que uso eficiente do chuveiro, lavatório e bacia sanitária reduziu cerca de 40% do consumo total.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). NBR 9646— “*Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário*”. Rio de Janeiro.

BARRETO, Douglas. (2008) “*Perfil do consumo residencial e usos finais da água. Ambiente Construído*”, v. 8, n. 2, p. 23-40. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/download/5358/3280>>

BARRETO, D.; MEDEIROS, O. (1999). “*Caracterização da vazão e frequência de uso de aparelhos sanitários*”. *Ambiente Construído*, v. 8, n. 4, p. 137–149. Disponível em: <seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/download/5939/4713>.

BARRETO, D.; ROCHA, A.L. (1999) “*Caracterização do consumo de água de aparelhos sanitários economizadores de água*”. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES. Rio de Janeiro.

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.

FEITAL, J. D. C., SPERS, E. E., NOVAES NETTO, A. F., SPERS, V. R. E., & PONCHIO, M. C. (2008). “*O consumo consciente da água: um estudo do comportamento do usuário doméstico*”. Anais do III Encontro de Marketing da Associação Nacional Pós-Graduação em Administração. Curitiba, PR, Brasil.

FERREIRA, T. D. V., & GONCALVES, O. M. (2020). “*Stochastic simulation model of water demand in residential buildings.* Building Services Engineering Research and Technology, v. 41, n. 5, p. 544-560.

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.

ILHA, M. S. d. O.; GONÇALVES, O. M. (1991). “*Estudos de parâmetros relacionados com a utilização de água quente em edifícios residenciais*”. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, v. 38.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2011). “*Sinopse do censo demográfico*”. Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, L. H. de et al. (2013). “*Modelling of water demand in building supply systems using fuzzy logic*”. Building Services Engineering Research and Technology, v. 34, n. 2, p. 145–163. ISSN 0143-6244. Disponível em: <<http://bse.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0143624411429381>>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (2013). “*How much water is needed in emergencies?*” Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/WHO_TN_09_How_much_water_is_needed.pdf?ua=1>. Acesso: 15 Jan 2020.