XIII SIMPÓSIO NACIONAL DE SISTEMAS PREDIAIS
DESEMPENHO E INOVAÇÃO
DE SISTEMAS PREDIAIS HIDRÁULICOS
SÃO PAULO – 04 DE OUTURO DE 2019

Modelo de simulação estocástica da demanda de água em edifícios residenciais

Stochastic simulation model of water demand in residential buildings

FERREIRA, Tiago[1]; GONÇALVES, Orestes[2]

[1] Universidade de São Paulo, Av. Prof. Almeida Prado, trav.2 nº. 83 Cidade Universitária, São Paulo – SP, Brasil, tvasconcelosgf@gmail.com

[2] Universidade de São Paulo, orestes.goncalves@usp.br

RESUMO

Ao longo dos anos, pesquisadores vêm realizando estudos para investigar o perfil de consumo de água em edificações, o que contribui para o conhecimento sobre o correto dimensionamento dos sistemas hidráulicos prediais. No contexto dos métodos para caracterização das solicitações, as rotinas comumente utilizadas para obtenção das vazões de projeto foram propostas, em sua grande maioria, na metade do século XX. Esses modelos precisam ser revisados e adaptados para a realidade atual da conservação da água. Nos últimos anos, alguns estudos têm proposto modelos de simulação com foco de aplicação em sistemas de distribuição de água, devido ao comportamento aleatório e temporal das solicitações neste tipo de sistema. Neste estudo, foi proposto um modelo de simulação estocástico da demanda de água em edifícios residenciais, que contemplou a modelagem comportamental dos usuários e sua interação com o sistema, a fim de melhorar o processo de projeto de sistemas de distribuição de água. Para tal, foram revisadas as bases teóricas de modelos previamente propostos para a identificação de aspectos significativos para a construção de um novo modelo, que mesclaram a modelagem comportamental dos usuários e o sistema hidráulico. Simulações foram feitas com finalidade de aplicação do modelo proposto no trabalho. Ao comparar as vazões obtidas pela simulação e pelo Método dos Pesos Relativos nas tubulações do barrilete de um edifício hipotético, a redução da vazão de projeto variou entre 10 e 73%. Em termos de consumo de material, a redução ficou entre 25% e 63%.

Palavras-chave: Demanda de água, Vazão de projeto, Simulação computacional.

ABSTRACT

Over the years, researchers have been conducting studies to investigate the water consumption profile in buildings, which contribute to the knowledge regarding the correct sizing of the building hydraulic systems. In context of the methods for characterization of requests, the routines commonly used to obtain the project flows were mostly proposed in mid-20th-century. These models need to be revised and adapted to nowadays water conservation reality. In recent years, some studies have proposed simulation models with application focus in water distribution systems, due to the random and temporal behavior of the requests in this type of system. In this study, a stochastic simulation model of water demand in residential buildings has been proposed, which contemplated the behavioral modeling of users and their interaction with the system, in order to improve the design process of water distribution systems. For such, the theoretical bases of previously- proposed models for the identification of significant aspects for the construction of a new model were revised, which merged the behavioral modeling of users and the hydraulic system. A simulation was made to apply the model proposed in the paper. When comparing the flows obtained by the simulation and the Brazilian Standard Method, in roof pipes, the reduction of the project flow varies from 10 to 73%. In terms of material consumption, the reduction was between 25% and 63%.

Keywords: *Water demand, Design flow rates, Computational simulation.*

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, pesquisadores têm liderado estudos com o objetivo de investigar o perfil de consumo de água em edifícios. Estes estudos contribuem para o conhecimento no que tange ao dimensionamento dos sistemas prediais, seja na proposição de métodos ou modelos que descrevam as solicitações nestes sistemas ou com dados da demanda, que auxiliam no entendimento do comportamento das variáveis associadas. Diversos aspectos podem influenciar os níveis de demanda; estes devem ser considerados para estimar a demanda simultânea máxima e garantir a eficiência e economia do sistema implantado.

No contexto dos métodos para a caracterização das solicitações nos sistemas de distribuição de água, os procedimentos comumente empregados para a obtenção das vazões de projeto foram, em sua maioria, propostos na metade do século XX. O método proposto por Hunter (HUNTER, 1940) é amplamente utilizado em países como os Estados Unidos, Inglaterra e Japão; os métodos baseados na aplicação de raiz quadrada são usados em países como Alemanha, Brasil e Holanda. Nos últimos anos, alguns autores apresentaram modelos de simulação com foco de aplicação em sistemas prediais de distribuição de água. Petrucci e Gonçalves (2002) combinaram a Teoria dos grafos para representação do sistema hidráulico e um modelo *bottom-up* de simulação estocástica, em que cada aparelho é tratado de forma independente e as vazões são resultados da pressão disponível em cada ponto de utilização; Blokker, Vreeburg e Van Dijk (2010) sugeriram um modelo *bottom-up* de simulação estocástica em que o instante de acionamento dos aparelho sanitários varia em função das rotinas dos usuários do sistema; Oliveira et. al. (2013) apresentaram uma simulação em que considerou utilização de lógica-nebulosa para a determinação do tempo de banho dos usuários. Estes modelos não avaliaram o real impacto quando utilizados os modelos de simulação durante o processo de dimensionamento dos componentes do sistema predial de distribuição de água.

Neste estudo, um modelo de simulação estocástica foi desenvolvido para determinar a demanda de água com base na caracterização do comportamento do usuário e na interação do usuário com o sistema. Assim, a aplicação do modelo será demonstrada para o dimensionamento do sistema hidráulico de um edifício, destacando assim todos os benefícios deste tipo de abordagem nos processos de tomada de decisão e avaliação de desempenho dos sistemas de distribuição de água.

2 APRESENTAÇÃO DO MODELO

A caracterização das vazões em sistemas de distribuição de água depende da interação entre os usuários e o sistema. Para fins de modelagem, essa caracterização pode ser dividida em dois grupos: o grupo de usuários e o grupo de sistemas. No grupo de usuários, fatores populacionais (quantidade, distribuição e organização) são considerados; no grupo do sistema, aspectos relacionados ao sistema hidráulico são considerados. Nas seções seguintes, uma metodologia foi apresentada para o estudo da demanda de água em sistemas de distribuição de edifícios residenciais.

2.1 Modelagem dos usuários do sistema

A caracterização do usuário é um passo fundamental para a construção do perfil de demanda de equipamentos sanitários e para toda a demanda de água do edifício estudado. O processo de geração de um usuário do sistema é baseado no número de andares e apartamentos (variável determinística) do edifício e na definição dos grupos populacionais de edifícios (variável aleatória), que variam de lugar para lugar (cidades, estados, regiões e países, entre outros)

2.2 Modelagem do sistema hidráulico

As relações físicas entre os componentes do sistema de distribuição de água podem ser descritas via teoria dos grafos (PETRUCCI; GONÇALVES, 2001). A caracterização de um componente pode ser realizada usando um banco de dados contendo os parâmetros deste que são considerados necessários para o processo de configuração do sistema. A Figura 1 mostra um sistema hipotético de distribuição de água com seus componentes.

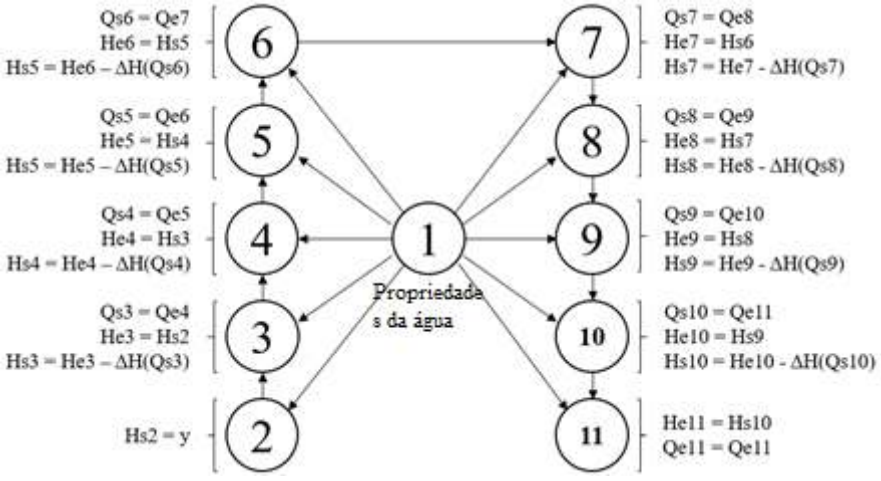
FIGURA 1 – Sistema de distribuição de água hipotético.



Fonte: Autores

Para representar um sistema de distribuição de água através de um grafo, os componentes do sistema são representados como vértices (nós) e as relações entre as propriedades do componente são representadas como arestas do grafo. A Figura 2 mostra a representação do sistema ilustrado na Figura 1, aplicando os conceitos da teoria dos grafos, onde He é a pressão de entrada de um componente, Hs é a pressão de saída, Qe é a vazão de entrada, Qs é a vazão, y é a altura da água no tanque, ΔH é a perda de carga total no componente, Ze é a cota de entrada geométrica e Zs é a cota de saída geométrica.

FIGURA 2. Representação das relações entre as propriedades dos componentes do sistema apresentado



Fonte: Autores

A duração da descarga de aparelhos sanitários, denominada t, baseia-se na maneira pela qual os usuários ativam os aparelhos sanitários e em seu comportamento temporal após sua ativação. A frequência de uso de aparelhos sanitários durante um dia, denotado como f, pode ser classificada de acordo com a abrangência de usuários alcançados ao utilizar o aparelho; portanto, distinguem-se entre aparelhos para uso individual e aparelhos para uso coletivo. A variável que descreve a vazão de aparelhos sanitários - denotado como q - foi estabelecida de acordo com a capacidade de permitir ajustes de vazão, como aparelhos predeterminados e aparelhos de ajuste contínuo.

2.3 Modelagem da variável que representa o instante de acionamento do aparelho sanitário

A variável aleatória, denotada como τ, representa o instante em que os aparelhos sanitários são utilizados no modelo e segue a metodologia proposta por Blokker, Vreeburg e Van Dijk (2010); a função de densidade de probabilidade dessa variável aleatória pode ser obtida como uma função das variáveis de rotina de cada usuário do sistema (por exemplo o horário em que o usuário acorda, sai de casa, retorna para a residência ou dorme).

3 DADOS DE ENTRADA DO MODELO

Os dados para a caracterização dos usuários do prédio variam de acordo com o local e o tipo de construção. Esses dados podem ser encontrados em bancos de dados do governo. O Quadro 1 lista os grupos populacionais identificados no Brasil e o Quadro 2 lista os dados que podem ser utilizados para classificação de idade dos usuários (IBGE, 2011). Estes dados serão necessários para a criação dos usuários do modelo (quantidade) e classe de idade dos usuários criados.

QUADRO 1 - Grupos da população brasileira e seus respectivos percentuais de ocorrência

Grupo populacional	%
Uma pessoa	14.60
Casal sem filhos	20.00
Casa com filhos	42.30
Apenas um adulto e filhos	16.30
Famílias de outros tipos	6.50
Outros tipos	0.30

QUADRO 2 - Grupos etários utilizados no modelo de simulação

Grupo	Descrição	%
Grupo 1	Criança	54
	Adolescente	46
Grupo 2	Adulto	84
	Idoso	16
Grupo 3	Adulto	100

Fonte: IBGE (2011).

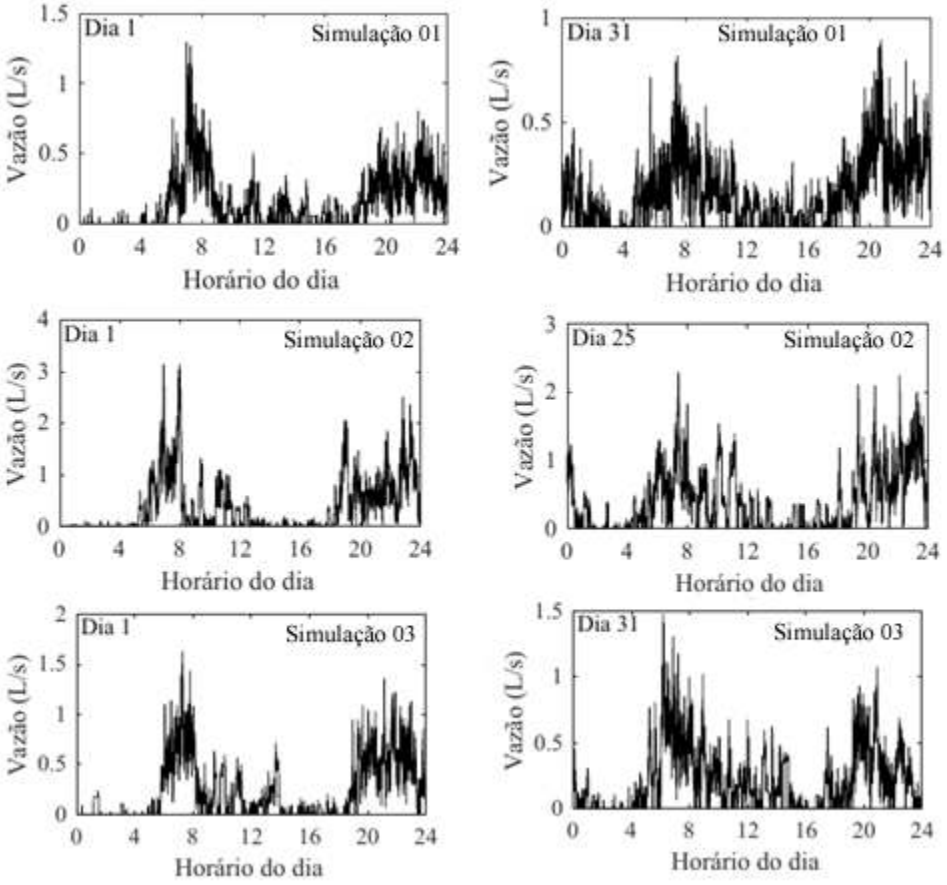
4 SIMULAÇÃO

A simulação do modelo foi realizada para um sistema de distribuição de água de um edifício hipotético de 12 andares, com três apartamentos por andar. Cada apartamento tem uma pia, um tanque e uma máquina de lavar roupa, bem como dois banheiros, cada um com um chuveiro, um vaso sanitário e um lavatório. Todos os apartamentos possuem medição individualizada de água.

Uma vez que o chuveiro é o aparelho sanitário com maior probabilidade de estar em uso simultâneo, este foi utilizado para o estudo de sensibilidade do modelo de simulação. No total, foram simulados três cenários: no primeiro foi utilizado, em todos os apartamentos do sistema, o chuveiro convencional medido pelos autores Ilha e Gonçalves (1991); no segundo caso, foi utilizado um chuveiro com vazão característica elevada com média de 0,35 L/s e desvio padrão de 0,03 L/s; e no terceiro caso, foram considerados diferentes tipos de chuveiros distribuídos por todo o edifício, com vazões médias que variaram entre 0,12 L/s e 0,35 L/s.

A Figura 3 apresenta as vazões que ocorreram no barrilete do edifício nas três simulações. No primeiro dia da Simulação 01, a vazão máxima foi de 1,29 L/s às 6h59min e no trigésimo primeiro dia a vazão máxima foi de 0,90 L/s às 21h26min; No primeiro dia da Simulação 02, a vazão máxima foi de 3,14 L/s às 6h55min e no vigésimo quinto dia a vazão máxima foi de 2,29 L/s às 7h24min; e no primeiro dia da Simulação 03 a vazão máxima foi de 1,63 L/s às 7h17min e trigésimo primeiro dia a vazão máxima foi de 1,48 L/s às 6h12min.

FIGURA 3 - Vazões que ocorreram no barrilete do edifício em diferentes dias das simulações 01, 02 e 03

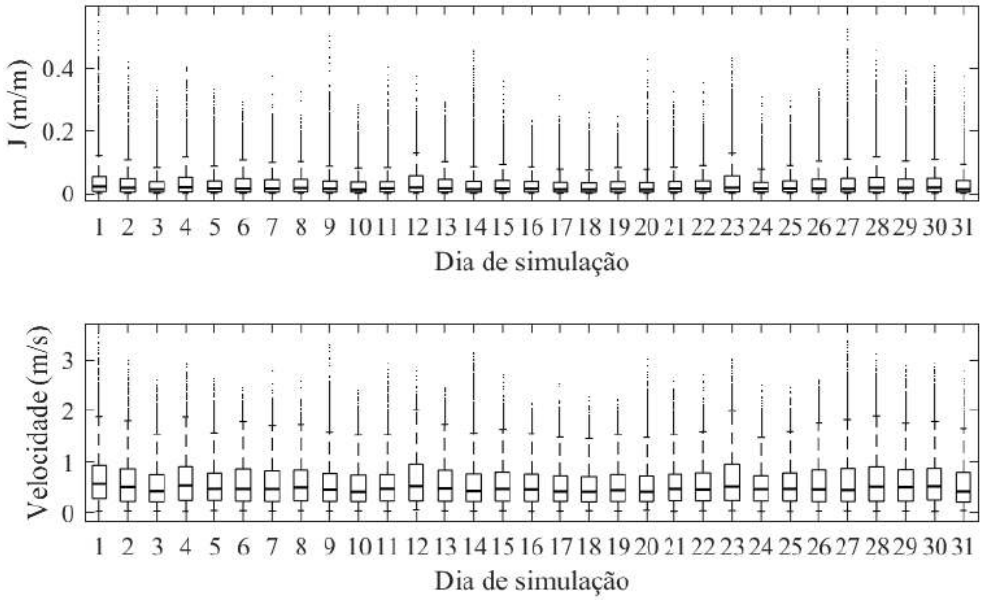


Fonte: Autores.

Para a determinação do período de pico na simulação, foi estabelecido que este é o período com maior consumo de água durante uma hora. Quando considerado os dados relativos às vazões que ocorreram nos períodos de pico nas simulações, a vazão de projeto no barrilete foi de 1,02 L/s na Simulação 01, 3,37 L/s na Simulação 2 e 1,67 L/s na Simulação 03, com 1% de probabilidade de falha. A vazão de projeto obtida quando utilizado o Método dos Pesos Relativos é de 3,77 L/s.

O processo para dimensionamento dos diâmetros dos componentes do sistema é iterativo e baseia-se na variação da velocidade máxima admissível dos componentes em posse da vazão de projeto. Em todos os casos, a velocidade máxima admissível inicial foi de 3 m/s. A Figura 4 mostra os dados que podem ser obtidos com a simulação e garante uma compressão das solicitações de um trecho de tubulação, neste caso, do barrilete da Simulação 01. Apesar do componente ter um diâmetro satisfatório para grande parte dos dados, é possível observar uma significativa quantidade de pontos que ultrapassam o limite de 3 m/s, ocasionando uma elevada perda de carga unitária (J) nestes instantes.

FIGURA 4 - Quartis da amostra da perda de carga unitária e das velocidades que ocorreram no trecho de tubulação estudado durante os 31 dias da Simulação 01, com velocidade admissível de 3 m/s



Fonte: Autores

De uma forma geral, o Quadro 3 mostra um resumo dos diâmetros iniciais e finais obtidos para os diferentes valores de velocidade máxima admissível adotados nas três simulações. Para cada configuração, é possível obter a velocidade que representa 99% de probabilidade de não ser ultrapassada.

QUADRO 3 - Grupos da população brasileira e seus respectivos percentuais de ocorrência

Simulação	**Vazão de projeto (L/s)**	**Diâmetro (mm)**		**Velocidade máxima admissível (m/s)**		**99% Dados (m/s)**	
		Inicial	**Final**	**Inicial**	**Final**	**Inicial**	**Final**
Simulação 01	1,02	20	25	3	2	1,62	0,92
Simulação 02	3,37	40	40	3	3	1,15	1,15
Simulação 03	1,67	25	32	3	2	1,59	0,99

Em termos de consumo de material, na Simulação 01 o sistema dimensionado resultou em um total de 139,33 kg de PVC, enquanto o sistema dimensionado utilizando o Método dos Pesos Relativos resultou em um total de 316 kg, representando um aumento de 63%; na Simulação 02, o sistema dimensionado resultou em um total de 349,69 kg de PVC, enquanto o sistema dimensionado utilizando o Método dos Pesos Relativos resultou em um total de 438,16 kg, um aumento de aproximadamente 25%; e na Simulação 03, o sistema dimensionado de acordo com as considerações feitas ao longo desta seção resultou em um total de 321,11 kg de PVC, enquanto o sistema dimensionado utilizando o Método dos Pesos Relativos resultou em um total de 439,20 kg, um aumento de aproximadamente 27%.

5 CONCLUSÃO

Os resultados da simulação apresentaram variabilidade de resultados que podem ser obtidos para o mesmo sistema físico de distribuição de água, apenas com a variação do tipo de chuveiro dos apartamentos. Nos trechos da tubulação do barrilete, a vazão de projeto de projeto obtida das simulações variou de 1,02 a 3,39 L/s, enquanto a obtida usando a norma brasileira foi de 3,77 L/s; o aumento médio variou de 10 a 73%.

Além disso, o estudo mostrou que a avaliação do comportamento real do sistema fornece evidências da inconsistência existente no processo de projeto dos sistemas de distribuição de água comumente utilizado. O dimensionamento baseado nas vazões de projeto, seja de natureza determinística ou probabilística, não garante a previsibilidade necessária para o dimensionamento dos diâmetros mais econômicos. A velocidade máxima permissível das seções pode ser relativizada como uma função da avaliação do comportamento do sistema e seu valor pode variar de acordo com a amostra de dados de fluxo considerada.

REFERÊNCIAS

BARRETO, D.; MEDEIROS, O. Caracterização da vazão e frequência de uso de aparelhos sanitários. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 4, p. 137–149, 2008.

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. January/February, p. 19–26, jan 2010. ISSN 0733-9496.

COURTNEY, R. A Multinomial Analysis of Water Demand. **Building and Environment**, v. 11, p. 203–209, 1976.

GONÇALVES, O. M. **Formulação de modelo para o estabelecimento de vazões de projeto em sistemas prediais de distribuição de água fria**. 1986. 203 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

HUNTER, R. B. **Methods of estimating loads in plumbing systems**. [S.l.]: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1940. 78–85 p.

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.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA: Sinopse do censo demográfico. Rio de Janeiro, 2011. 261 p.

KONEN, T. P.; Brady Jr., P. M. A review of the parameters in the Hunter model for estimating the demand for water supply and drainage. In: **W062 - Proceedings of the 3th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings**. Hørsholm, Denmark: CIB W062 - Water Supply and Drainage, 1974.

PETRUCCI, A. L.; GONÇALVES, O. M. Dimensionamento de redes prediais de água sob vazões reais. **Ambiente Construído,** v. 2, n. 4, p. 27–37, 2002.

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, maio 2013.

WISTORT, R. A new look at determining water demand in buildings: ASPE direct analytical method. In: **American Society of Plumbing Engineers Convention**. Kansas City, Missouri: American Society of Plumbing Engineers, 1994.