



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

José Eduardo Santos Araújo

Dimensionamento de Tanques de Armazenamento de Água Cinza Incorporando Estocasticidade e Riscos

São Cristóvão – SE

2021

José Eduardo Santos Araújo

Dimensionamento de Tanques de Armazenamento de Água Cinza Incorporando Estocasticidade e Riscos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal de Sergipe – UFS, para
encerramento do componente curricular e con-
clusão da graduação em Engenharia Civil

Universidade Federal de Sergipe (UFS)
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET)
Departamento de Engenharia Civil (DEC)

Orientador: Prof. Dr. Alcigeimes Batista Celeste

São Cristóvão – SE

2021

José Eduardo Santos Araújo.

Dimensionamento de Tanques de Armazenamento de Água Cinza
Incorporando Estocasticidade e Riscos/ José Eduardo Santos Araújo,
São Cristóvão – SE, 2021. 54 p. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Sergipe,
São Cristóvão – SE.

I. Universidade Federal de Sergipe. II. Título.

Dedico este trabalho a todos os estudantes do Brasil. Sim, é possível. Não desistam de seus sonhos.

Agradecimentos

Agradeço,

À Deus pelo dom da vida e saúde.

Aos meus pais, Edicia da Cruz Santos Araújo e José Araújo Filho, por toda dedicação e zelo por mim, em especial, na vida acadêmica.

Aos meus irmãos pelo apoio em todas as fases de minha vida, desde os anos iniciais de aprendizado.

A todos os professores que tive a oportunidade de desfrutar do conhecimento e ensinamentos de vida.

Ao meu professor orientador Alcigeimes por todo auxílio e paciência no processo.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Civil pelos ensinamentos que foram essenciais para este estudo final de curso.

Aos colegas do curso de Engenharia Civil pelo compartilhamento de ideias e conselhos que contribuíram na evolução acadêmica.

A todos os meus amigos que me deram a força e o apoio necessário para manter-me empenhado no trabalho e estudo.

*“Nosso pensamento é imperfeito, mas somente
pode ter sido criado por um ser perfeito que é
Deus.”*

(René Descartes)

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para dimensionamento estocástico de tanques (reservatórios) de águas cinzas usados para suprir demanda de vaso sanitário. Foram empregados dados de três pesquisas que discriminaram as vazões horárias por aparelho hidrossanitário do banheiro (chuveiro, lavatório e vaso sanitário). Um procedimento para converter desvios padrões estatísticos diários por aparelho para desvios horários foi proposto com o intuito de incorporar as incertezas nos dados. O dimensionamento foi realizado por meio de um modelo de otimização capaz de encontrar a melhor capacidade requerida perante limites predeterminados de confiabilidade mínima e risco máximo. Simulações foram conduzidas para um total de 25 configurações de valores de confiabilidade e risco em cada um dos três estudos de caso. Em todos os testes, foi constatado que a confiabilidade perante o risco é maior que a confiabilidade inicial proposta, de forma que o risco real é inferior ao risco fixado inicialmente e o procedimento de cálculo da capacidade era válido. Os resultados para as três séries de dados demonstraram comportamentos semelhantes no que diz respeito as duas variáveis de entrada do programa (confiabilidade e risco) em relação à capacidade, i.e., na medida em que se deseja mais confiabilidade e menos risco será necessária mais capacidade de armazenamento. O maior volume para o reservatório entre os dados dos três estudos de caso foi de aproximadamente 112 litros, que corresponderia a um recipiente de base de $1,0 \text{ m}^2$ com uma altura de 11,2 cm. Foi proposto um sistema onde as águas cinzas de um pavimento superior seriam direcionados para um tanque localizado no teto do banheiro do pavimento inferior que serviria para suprir a demanda do vaso sanitário e, caso em alguns momentos essa entrada fosse superior ao consumo, ocorreria o extravasamento para um tubo de queda específico de águas cinzas.

Palavras-chaves: Águas cinzas. Tanques. Dimensionamento. Estocasticidade.

Abstract

This work presents a methodology for stochastic sizing of greywater tanks (reservoirs) used to supply toilet demands. Data from three surveys that specified the hourly flow rates for each hydro-sanitary equipment (shower, washbasin and toilet) were used. A procedure to convert daily statistical standard deviations per device to hourly deviations was proposed in order to incorporate uncertainties in the data. The sizing was performed by means of an optimization model capable of finding the best storage capacity within predetermined limits of minimum reliability and maximum risk. Simulations were conducted for a total of 25 reliability and risk values in each of the three case studies. In all tests, it was found that the reliability within the risk is greater than the initial reliability proposed, so that the real risk is lower than the fixed risk and the capacity calculation procedure was valid. The results for the three data series showed similarity with regard to the two input variables (reliability and risk) in relation to capacity, that is, to the extent that more reliability and less risk are desired, more storage capacity will be needed. The largest volume for the reservoir among the data from the three case studies was approximately 112 liters, which would correspond to a tank with 1.0 m² of base area and 11.2 cm of height. A system was proposed where the greywater from an upper floor would be directed to a tank located on the ceiling of the bathroom on the lower floor that would serve to meet the demand of the toilet and, if at times this input was higher than consumption, overflow would occur to a specific greywater downpipe.

Keywords: Greywater. Tanks. Sizing. Stochasticity.

Lista de ilustrações

Figura 1	– Percentual de participação dos pontos de utilização no consumo diário médio.	21
Figura 2	– Usos finais da água por residência.	22
Figura 3	– Representação do histograma de frequência da capacidade indicando que K_a^{risk} é escolhida de forma que $\mathbb{P}(K_a > K_a^{\text{risk}}) = \text{RISK}$, que corresponde a área sombreada.	28
Figura 4	– Representação do histograma de frequência da confiabilidade indicando que R_T^{risk} é escolhida de forma que $\mathbb{P}(R_T \leq R_T^{\text{risk}}) = \text{RISK}$, que corresponde a área sombreada da figura. Se $R_T^{\text{min}} \leq R_T^{\text{risk}}$, então $\mathbb{P}(R_T < R_T^{\text{min}})$ é menor do que o risco assumido, validando a capacidade escolhida do reservatório.	29
Figura 5	– Demanda horária de água com representação dos desvios padrões horários.	32
Figura 6	– EC#1: Série de entradas (preto) e demandas (cinza) utilizadas para o dimensionamento.	33
Figura 7	– EC#1: Distribuição de probabilidade e gráfico boxplot para a capacidade (em litros).	35
Figura 8	– EC#1: Distribuição de probabilidade e gráfico boxplot para a confiabilidade na etapa de dimensionamento.	36
Figura 9	– EC#1: Distribuição de probabilidade da confiabilidade na etapa de validação.	36
Figura 10	– EC#1: Capacidade (em litros) vs. confiabilidade perante risco constante (as curvas correspondem a cada valor de risco segundo a legenda mostrada).	37
Figura 11	– EC#1: Capacidade (em litros) vs. risco perante confiabilidade constante (as curvas correspondem a cada valor de confiabilidade segundo a legenda mostrada).	38
Figura 12	– EC#1: Capacidade vs. confiabilidade e risco.	38
Figura 13	– EC#2: Série de entradas (preto) e demandas (cinza) utilizadas para o dimensionamento.	39
Figura 14	– EC#2: Distribuição de probabilidade e gráfico boxplot para a capacidade (em litros).	41
Figura 15	– EC#2: Distribuição de probabilidade e gráfico boxplot para a confiabilidade.	41
Figura 16	– EC#2: Distribuição de probabilidade da confiabilidade na etapa de validação.	42
Figura 17	– EC#2: Capacidade (em litros) vs. confiabilidade perante risco constante (as curvas correspondem a cada valor de risco segundo a legenda mostrada).	43
Figura 18	– EC#2: Capacidade (em litros) vs. risco perante confiabilidade constante (as curvas correspondem a cada valor de confiabilidade segundo a legenda mostrada).	43
Figura 19	– EC#2: Capacidade vs. confiabilidade e risco.	44

Figura 20 – EC#3: Série de entradas (preto) e demandas (cinza) utilizadas para o dimensionamento.	45
Figura 21 – EC#3: Distribuição de probabilidade e gráfico boxplot para a capacidade (em litros).	46
Figura 22 – EC#3: Distribuição de probabilidade e gráfico boxplot para a confiabilidade.	46
Figura 23 – EC#3: Distribuição de probabilidade da confiabilidade na etapa de validação.	47
Figura 24 – EC#3: Capacidade (em litros) vs. confiabilidade perante risco constante (as curvas correspondem a cada valor de risco segundo a legenda mostrada).	48
Figura 25 – EC#3: Capacidade (em litros) vs. risco perante confiabilidade constante (as curvas correspondem a cada valor de confiabilidade segundo a legenda mostrada).	48
Figura 26 – EC#3: Capacidade vs. confiabilidade e risco.	49
Figura 27 – Concepção estrutural de utilização de águas cinzas.	50

Lista de tabelas

Tabela 1	– Frequência média de uso diário para uma das residências, por morador. . .	15
Tabela 2	– Vazão por aparelho hidrossanitário por morador.	16
Tabela 3	– Indicadores de consumo individual.	18
Tabela 4	– Produção <i>per capita</i> diária de águas residuárias média das 4 residências. . .	18
Tabela 5	– Relações entre as águas servidas geradas das 4 residências.	19
Tabela 6	– Consumo médio horário dos diversos aparelho hidro sanitários em residências de Bagdá.	20
Tabela 7	– Consumo médio <i>per capita</i> por ponto de utilização no banheiro.	21
Tabela 8	– Dados de consumo horário por ponto de utilização do banheiro.	22
Tabela 9	– Valores médios horários por residência em usos finais convertido para a unidade litro.	23
Tabela 10	– Razões para oposição a reutilização de águas cinzas.	24
Tabela 11	– Razões para aceitar o reúso de águas cinzas.	24
Tabela 12	– Percentuais de aceitabilidade em diversos fins.	24
Tabela 13	– EC#1: Dados de consumo horário utilizados no dimensionamento.	34
Tabela 14	– Configuração para teste.	34
Tabela 15	– EC#1: Capacidades (em litros) encontradas para as entradas propostas. . .	37
Tabela 16	– EC#2: Dados de consumo horário utilizados no dimensionamento.	40
Tabela 17	– EC#2: Capacidades (em litros) encontradas para as entradas propostas. . .	42
Tabela 18	– EC#3: Dados de consumo horário utilizados no dimensionamento.	45
Tabela 19	– EC#3: Capacidades encontradas para as entradas propostas.	47

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização	12
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Reservatório de águas cinzas	15
2.1.1	Literatura relacionada e dimensionamento típico	15
2.1.2	Caracterização dos usos finais de água	17
2.1.3	Aceitabilidade da reutilização das águas cinzas	23
2.2	Dimensionamento de reservatórios	24
3	MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1	Modelo de otimização	26
3.2	Abordagem estocástica	27
3.3	Tratamento dos dados	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	Estudo de caso EC#1: dados brasileiros	33
4.2	Estudo de caso EC#2: dados iraquianos	39
4.3	Estudo de caso EC#3: dados americanos	44
4.4	Discussão dos resultados	47
	Conclusão	51
	REFERÊNCIAS	53

1 Introdução

1.1 Contextualização

A problemática da água é um dos temas mais importantes na atualidade pois, por ser um recurso limitado, seu planejamento é fundamental para preservação e reutilização. Além disso, sendo um fator limitante para o desenvolvimento agrícola, urbano e industrial, sua disponibilidade é uma contínua preocupação, principalmente por causa do crescimento populacional, das incertezas relacionadas aos fatores climáticos e da crescente poluição dos mananciais. Em termos globais, a quantidade de água disponível é superior ao total consumido pela população. No entanto, a distribuição deste recurso é desigual nas diversas regiões do planeta e em geral não é diretamente proporcional às necessidades. Estudos demonstram que, na maior parte da Terra, há déficit de recursos hídricos em decorrência da predominância da evaporação potencial sobre a precipitação (ARAÚJO, 1988). No Brasil, o consumo de água para fins urbanos corresponde a cerca de 21% da demanda total, e cerca de 50% desse consumo corresponde ao residencial (ANA, 2005).

Segundo Anderson (2001) é importante para a sustentabilidade hídrica a reutilização da água de qualidade inferior para fins não potáveis, uma vez que isso promove a redução da demanda sobre os mananciais. Todavia, o reúso de água requer medidas efetivas de proteção à saúde pública e ao meio ambiente, e ambos devem ser tecnicamente e economicamente viáveis. Desse modo, a grande vantagem da utilização da água de reúso é a de preservar a água potável, reservando-a exclusivamente para o atendimento das necessidades que exijam a sua potabilidade para o abastecimento humano. A substituição da água de boa qualidade por outra inferior, que contenha qualidade requerida para o destino traçado para ela, promove a diminuição da demanda sob os mananciais de água pura (FIORI; FERNANDES; PIZZO, 2006).

O consumo doméstico envolve vários tipos de usos finais como a higiene pessoal, o preparo de alimentos, a limpeza e irrigação de jardins, e pode variar de acordo com a cultura, renda familiar, tipo de habitação, tipo de abastecimento residencial, formas de gerenciamento da água e condições climáticas (HELLER L.; PÁDUA, 2006). Pertel (2009) discorre que o consumo de água para higiene (sanitários, pia e chuveiro) varia entre 50% a 74% do consumo total de água em uma residência.

Do consumo de água residual são gerados os esgotos domésticos. Estes compõem-se essencialmente da água de higiene, urina, fezes, papel, restos de comida, sabão, detergentes e águas de lavagem. Esses esgotos provêm principalmente de residências, edifícios comerciais, instituições ou quaisquer edificações que contenham instalações de banheiros, lavanderias, cozinhas, ou qualquer dispositivo de utilização da água para fins domésticos (FUNASA, 2006). Relacionada à gestão da demanda, a prática do reúso de águas servidas que não possuem

contribuição fecal, se mostra como uma alternativa para atender demandas que não exigem o uso de uma água nobre. Essas águas, conhecidas como águas cinzas, são aquelas residuárias provenientes do uso de lavatórios, chuveiros, banheiras, máquinas de lavar roupa e tanque (JEFFERSON et al., 2000), e podem ser empregadas na descarga de bacia sanitária.

Grande parcela da água potável utilizada em residências serve para atender as necessidades de higiene pessoal e limpeza dos moradores. Essa água, depois de utilizada para essas finalidades, é direcionada para a coleta de esgoto convencional sendo misturada com as águas da descarga sanitária. Ao invés disso, a segregação desses resíduos promove a separação dos fluxos dos diferentes tipos de efluentes domésticos de acordo com suas características, visando reutilizá-los ou minimizá-los e ao mesmo tempo gerar redução do consumo de energia em atividades de saneamento. Nesse sentido, o saneamento ecológico é uma nova concepção que se enquadra dentro de um conceito de sustentabilidade necessário aos novos tempos, sendo que a caracterização destes diferentes tipos de águas residuárias é de fundamental importância para o sucesso dos projetos de reúso (ESREY et al., 1998).

A reutilização das águas cinzas com a finalidade de realizar descargas sanitárias é estudada com o propósito de dimensionar reservatórios para operar de acordo com a necessidade da realização de descargas do vaso sanitário. Esses estudos geralmente preveem o dimensionamento de um reservatório de forma determinística, ou seja, apenas com os resultados de geração de águas cinzas para um único cenário diário. Esses reservatórios estariam localizados no térreo e a água seria direcionada para a rega de plantas ou através de motobombas subiriam para um reservatório superior com o intuito de servir de fonte para a demanda da descarga.

O presente trabalho traz uma nova visão para esse reservatório (tanque), pois pretende concebê-lo a partir da utilização da água cinza, no caso de um edifício, do pavimento superior como entrada para o reservatório que servirá para sustentar a demanda da descarga sanitária do pavimento inferior do prédio. Dessa forma, não seria necessário o gasto com a compra da motobomba e nem com energia no processo, já que o sistema funcionaria por gravidade. O dimensionamento desse reservatório irá atingir um valor de capacidade sob a qual, ao ser operado com as diferentes entradas e saídas, poderá extravasar em períodos de maior entrada ou secar em períodos de maior demanda, nestes casos podendo ser utilizada a rede convencional de água.

A literatura existente tipicamente considera apenas o volume total diário para dimensionar deterministicamente o reservatório, ou seja, não leva em consideração como seria o comportamento horário das entradas e saídas de água. Nesta pesquisa, são utilizados dados de entradas e saídas horárias para uma residência levando-se em consideração que em determinadas horas do dia haverá maiores picos de entrada de águas cinzas do pavimento superior ou maior consumo da descarga sanitária do pavimento inferior.

Este trabalho pretende contribuir com a tentativa de dimensionar através de métodos estocásticos, que consideram as incertezas horárias de geração e de demanda em um reservatório de água cinza residencial a partir da água cinza produzida em banheiro (chuveiro e lavatório)

sendo consumida pela demanda do vaso sanitário.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal realizar o dimensionamento estocástico de um reservatório a partir da geração de águas cinzas em um banheiro pelo chuveiro e lavatório.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Estimar o consumo de água para uma residência através do levantamento do tempo de uso dos aparelhos e de suas vazões;
- b) Realizar a revisão bibliográfica de artigos nacionais e internacionais que possuam dados de usos finais desses aparelhos discriminados em cada hora do dia;
- c) Propor o dimensionamento que leve em consideração as incertezas de entradas e saídas do reservatório de águas cinzas;
- d) Propor um reservatório capaz de suprir a demanda por água para vasos sanitários a partir das águas residuárias de aparelhos hidrossanitários;
- e) Idealizar um modelo de utilização predial de águas cinzas onde os apartamentos compartilharão as águas cinzas sem que seja necessário a instalação de bombas elevatórias.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Reservatório de águas cinzas

2.1.1 Literatura relacionada e dimensionamento típico

Oliveira (2005) e Ferreira (2005) realizaram o dimensionamento de reservatório (inferior e superior) com a reutilização das águas da chuva e do reaproveitamento das águas servidas provenientes de chuveiros, lavatórios, tanque e máquina de lavar roupas. Para o levantamento do consumo diário, obtiveram primeiramente as frequências e os tempos de uso em cada aparelho hidrossanitário por morador de cada residência. Nesses trabalhos, o levantamento foi realizado em um período de 28 dias. Sendo assim, as frequências médias de uso em cada aparelho hidrossanitário por pessoa, no período do levantamento de consumo de água, foram determinadas através da razão entre a frequência de uso total e o número de dias em que cada pessoa esteve na residência. O tempo médio de uso de cada aparelho também foi determinado por meio da razão entre os tempos totais de uso do aparelho no período e o número de dias em que cada pessoa usou o aparelho. A frequência de uso diário utilizada na pesquisa de Oliveira (2005) para uma das residências e o tempo médio de uso estão descritos na Tabela 1.

Na metodologia descrita nesses trabalhos, o volume de usos finais por aparelho hidrossanitário para cada pessoa foi calculado através da multiplicação do tempo de uso pela frequência de uso diário e pela vazão de cada aparelho, vazão essa que foi medida por meio de um recipiente de volume conhecido e contando-se o tempo em que o mesmo levou para encher. Esse processo foi realizado três vezes em cada aparelho e então utilizada a média destes valores no levantamento de consumo de água. Já para o vaso sanitário não realizou-se medição de vazão devido a dificuldade de realização da mesma, portanto adotou-se o valor de 1,7 l/s, recomendado pela NBR 5626 (ABNT, 2011). Essas vazões usadas na pesquisa de Oliveira (2005) para uma das residências está descrita na Tabela 2.

Ambos os trabalhos concluíram que essas águas servidas seriam suficientes para abastecer a demanda do vaso sanitário, porém não levaram em consideração que a disponibilidade de águas cinzas e de consumo do vaso sanitário varia em função das horas e o reservatório

Tabela 1 – Frequência média de uso diário para uma das residências, por morador.

Aparelho	Mulher		Homem	
	Frequência média	Tempo de uso (s)	Frequência média	Tempo de uso (s)
Chuveiro	1,17	409,57	1,09	545,22
Lavatório	6,26	7,74	3,22	8,04
Vaso sanitário	5,00	5,09	3,26	6,04

Fonte: Adaptada da Tabela 4.3 de Oliveira (2005).

Tabela 2 – Vazão por aparelho hidrossanitário por morador.

Aparelho	Mulher	Homem
	Vazão (l/s)	Vazão (l/s)
Chuveiro	0,12	0,13
Lavatório	0,10	0,11
Vaso sanitário	1,70	1,70

Fonte: Adaptada da Tabela 4.6 de Oliveira (2005).

foi dimensionado apenas levando em consideração o volume diário produzido. Além disso, o dimensionamento não levou em consideração as incertezas na geração das entradas no reservatório e nem no consumo pelo vaso sanitário. Também não se notou a preocupação com a confiabilidade do sistema, ou seja, com a quantidade de falhas na operação do mesmo já que podem haver momentos de intenso uso da demanda do vaso sanitário e uma geração pequena de águas cinzas.

Oliveira (2005) realizou análise de viabilidade econômica de investimento para os sistemas de reaproveitamento de água da chuva, de reúso de água e os dois ao mesmo tempo. A análise foi realizada utilizando-se o Método do Valor Presente Líquido (VPL) e o Período de Retorno do Investimento (Payback).

Pertel (2009) propôs uma comparação entre o uso da água e da energia atrelada à água em uma edificação multifamiliar dotada de um sistema hidrossanitário (convencional) e um sistema de reúso de águas cinzas. Os dados foram coletados por meio da observação dos hidrômetros da residência em estudo. O trabalho avaliou o consumo de água e as possíveis perdas em uma edificação residencial provida de um sistema de reúso de águas cinzas, por meio da setorização e estudo da variação de consumo horária, diária e sazonal, da comparação de indicadores por pessoa, além de avaliar a demanda de energia para sustentar o abastecimento (kW/m^3).

No edifício em estudo o sistema hidrossanitário na edificação foi concebido de forma a coletar as águas residuárias segregadas em águas cinzas e águas negras (efluentes de bacias sanitárias e cozinha) e duas linhas independentes e exclusivas para o abastecimento de água: uma de reúso e a outra de água potável. As águas cinzas e as águas negras eram coletadas por tubulações distintas e conduzidas a tratamentos diferenciados. Após o tratamento da água cinza, existia um reservatório inferior e outro superior para armazenagem e distribuição da água de reúso. Os reservatórios de água de reúso e de água potável eram independentes. Foi prevista a reversão do sistema de reúso para abastecimento com água potável, quando necessário. Em caso de falta de água de reúso, o reservatório de água de reúso podia ser abastecido com água potável, situação que precisaria de um processo manual de abertura e fechamento de válvulas das tubulações de recalque. Não havia risco de contaminação da tubulação de água potável com água de reúso, visto que a tubulação de água potável chegava no reservatório do lado oposto da água de reúso. As águas negras ou fecais eram conduzidas a rede pública de esgoto sanitário.

Pertel (2009) separou as águas do condomínio estudado em águas cinzas, provenientes

das águas residuárias do chuveiro, dos lavatórios e das máquinas de lavar roupas, coletadas por tubulações próprias, e em águas de reúso, provenientes do tratamento das águas cinzas utilizadas para a descarga das bacias sanitárias, para a limpeza da área comum, lavagem de automóveis e rega da área permeável da edificação. Pertel (2009) demonstrou que a produção *per capita* média por dia da semana de águas cinzas (oferta) foi superior ao consumo *per capita* médio de água de reúso (demanda) durante todos os dias da semana.

Pertel (2009) concluiu que o consumo encontrado para a edificação convencional mostrou-se 67% superior ao consumo da edificação dotada de reúso, fato que ratifica a importância do uso de fontes alternativas como medida de conservação de água. Já quando avaliado o consumo energético do recalque, verificou-se que esse setor apresenta gasto significativo no consumo de energia da edificação como um todo, correspondendo a 8% no edifício convencional e 7% no dotado de reúso. A autora concluiu também que a implantação do sistema de reúso de águas cinzas na edificação mostrou-se uma maneira eficiente de conservação de água, tendo em vista que houve uma redução do consumo de água potável quando comparada a uma edificação convencional, para todos os períodos avaliados. Para ela, outro ganho importante com a utilização de água de reúso foi a diminuição do volume de esgoto gerado, fator que pode contribuir para a elaboração de novos projetos de redes coletoras adaptadas a essa nova realidade de consumo.

2.1.2 Caracterização dos usos finais de água

Sant'Ana, Boeger e Monteiro (2013) focaram na caracterização dos usos finais de água do estoque de edificações residenciais em Brasília, e na identificação do potencial de redução do consumo de água promovido pelos sistemas de aproveitamento de águas pluviais e de reúso de águas cinzas. Para tal, os autores realizaram a distinção entre o consumo de água comunal e o consumo de água individual nas edificações residenciais. Em relação ao consumo individual, foi utilizado o parâmetro de consumo litros por pessoa por dia (l/p/d), sendo que esses dados foram obtidos através da soma dos tempos de utilização de cada equipamento hidráulico, tempo esse que multiplicado pela vazão do equipamento gera o consumo em litros de cada peça hidráulica. As vazões das torneiras e chuveiros foram estimadas através do tempo necessário para encher um recipiente de um litro, porém para o aparelho sanitário não foi estimada a vazão pois considerou-se um volume por acionamento de acordo com o modelo de vaso sanitário (6, 9 ou 12 litros). O consumo *per capita* obtido por Sant'Ana, Boeger e Monteiro (2013) foi de 172 l/p/d. Por meio do preenchimento de questionários os moradores identificaram os usos finais presente na Tabela 3.

Menezes, Magalhães Filho e Loureiro (2011) realizaram um estudo para propor uma alternativa simplificada para quantificação de águas residuárias em residências a fim de conhecer o hábito das pessoas e auxiliar no dimensionamento de sistemas naturais de tratamento e reúso. O estudo foi realizado em duas residências compostas por 3 pessoas (um casal e uma criança), uma por 4 pessoas (quatro adultos, 2 homens e 2 mulheres) e uma por 2 pessoas (2 homens).

Tabela 3 – Indicadores de consumo individual.

Usos finais	Vazão (l/min)	Volume (l)	Frequência	Demanda (l/p/d)
Lavatório	6,7	-	3,1 (min)	21
Chuveiro	5,7	-	9,2 (min)	53
Descarga sanitária	-	9,0	4 (usos)	35

Fonte: Adaptada da Tabela 2 de Sant'Ana, Boeger e Monteiro (2013).

Tabela 4 – Produção *per capita* diária de águas residuárias média das 4 residências.

Aparelhos sanitários	Média $\pm$ Desvio padrão
Chuveiro	35,7 $\pm$ 9,4
Lavatório	11,5 $\pm$ 10,9
Bacia sanitária	49,3 $\pm$ 11,7
Máquina de lavar roupas	26,9 $\pm$ 2,5
Tanque	7,5 $\pm$ 6,3
Águas Cinzas Banheiro	47,2 $\pm$ 12,8
Águas Cinzas claras	81,5 $\pm$ 17,5
Águas Negras	49,3 $\pm$ 11,7
Total	130,8 $\pm$ 23,9

Fonte: Adaptada da Tabela 1 de Menezes, Magalhães Filho e Loureiro (2011).

Para a quantificação das águas cinzas geradas, em um primeiro momento, procurou-se conhecer a rotina dos moradores das residências através de observações e aplicação de questionários durante 3 semanas (21 dias).

Nesse estudo, foram utilizados questionários compostos de planilhas de anotação para cada ponto de geração de águas residuárias tais como o chuveiro, o lavatório, a descarga, a pia da cozinha, o tanque e a máquina de lavar roupas. Para as planilhas de quantificação de águas cinzas (chuveiro, lavatório, pia da cozinha, tanque e máquina de lavar roupas) eram anotados a frequência e a duração de uso. Na planilha de águas negras, anotava-se a frequência de uso da bacia sanitária com a data e se a descarga era para urina ou fezes, ou para ambas.

Os resultados da pesquisa de Menezes, Magalhães Filho e Loureiro (2011) são apresentados de forma adaptada na Tabela 4, onde é possível notar a quantidade de águas residuárias produzidas diariamente por pessoa em cada residência em estudo, bem como sua classificação em águas cinzas claras do banheiro e águas cinzas claras de toda a residência, além das águas negras. A adaptação foi realizada pois para a presente pesquisa não cabe analisar a contribuição da água de pia pela dificuldade em reutilizá-la no formato em estudo por possuir efluentes como óleos e gorduras. Além dos valores de consumo *per capita* por residência nota-se a média e o desvio padrão por aparelho sanitário.

A Tabela 5 traz as relações entre os diferentes tipos de água, onde é possível notar que as águas cinzas claras do banheiro constituem cerca de 57,3% das águas cinzas geradas nas residências e as águas negras geradas nas residências representam em média 60,6% das águas cinzas claras produzidas nas próprias residências, ou seja, se houver algum tipo de tratamento para posterior reúso, a demanda necessária de água para a bacia sanitária pode ser facilmente

Tabela 5 – Relações entre as águas servidas geradas das 4 residências.

Relação	Média ± Desvio padrão
ACB/ACT (%)	57,3 ± 9,4
AN/ACT (%)	60,6 ± 9,8

Legenda: ACB - Águas Cinzas Banheiro; ACT - Águas Cinzas Claras; AN - Águas Negras.

Fonte: Adaptada da Tabela 3 de Menezes, Magalhães Filho e Loureiro (2011).

atendida.

Menezes, Magalhães Filho e Loureiro (2011) inferiram que, considerando o uso da máquina de lavar roupas, a produção de águas cinzas atendeu à demanda requerida pelas bacias sanitárias durante todo o período, ou seja, em todos os dias a geração de águas residuárias foi superior ao consumo pelo vaso sanitário. Porém, desconsiderado-se o uso da máquina de lavar roupas em alguns dias a demanda para a bacia sanitária não foi atendida. Nessa pesquisa, não foi considerada o fato de que a geração das águas residuárias não é constante ao longo do dia, ou seja, a vazão varia dependendo do poder aquisitivo, da quantidade de moradores e seus hábitos.

Menezes, Magalhães Filho e Loureiro (2011) encontraram que a maior produção de água cinza nas residências do estudo é proveniente do banheiro (chuveiro + lavatório) tendo em torno de 57% do total de água cinza produzida, o que não difere muito dos padrões de produção consultados na literatura, mostrando que o padrão de produção de águas cinzas é semelhante mesmo em diferentes localidades. Além disso, o conhecimento das produções específicas de água cinza é de grande importância para se definir onde priorizar as ações de conservação de água e reúso no âmbito das residências (Pansonato et al., 2007 apud Menezes, Magalhães Filho e Loureiro, 2011).

Abbood, Mustafa e Ali (2013) realizaram um estudo com o objetivo de coletar informações suficientes sobre a produção de águas cinzas na cidade de Bagdá (Iraque) e julgar se a água cinza pode ser um dos responsáveis pelo melhor gerenciamento dos recursos hídricos. Para tal, foi buscado avaliar o consumo diário e horário em Bagdá, estimando a quantidade de água cinza gerada em domicílios típicos daquela cidade. A pesquisa foi administrada em um período de 21 semanas, durante as quais foram coletados dados de 575 domicílios em um número total de 3218 participantes. Para realizar a coleta de dados, levou-se em consideração que Bagdá está dividida em dois lados: Rusafa e Kerkh. O estudo foi realizado em seis seções de cada lado, com proprietários de casas com diferentes origens socioeconômicas espalhados pela cidade.

A geração de água cinza varia de acordo com as práticas de economia de água de cada indivíduo em uma residência (ABBOOD; MUSTAFA; ALI, 2013). Com isso, o estudo obteve através de questionários uma média de consumo de água de 116 l/p/d, em que 71% pode ser captada e reciclada como água cinza, ou seja, 83 l/p/d.

Abbood, Mustafa e Ali (2013) concluíram que as águas cinzas do banheiro (banheira, lavatório e chuveiro) contribuem com aproximadamente 50% do total de volume de águas cinzas da residência. As águas das lavanderias contribuíam em aproximadamente 30% e as águas cinzas

Tabela 6 – Consumo médio horário dos diversos aparelho hidro sanitários em residências de Bagdá.

	Vaso sanitário (L)	Lavatório (L)	Chuveiro (L)	Água cinza (L)
01 h	28	2	2	4
02 h	0	0	0	0
03 h	5	2	2	4
04 h	7	2	2	4
05 h	10	2	2	4
06 h	18	2	2	4
07 h	50	35	4	39
08 h	90	40	50	90
09 h	60	20	60	70
10 h	40	10	25	35
11 h	37	15	35	50
12 h	25	8	10	18
13 h	25	8	3	11
14 h	30	20	2	22
15 h	25	20	15	35
16 h	25	10	3	13
17 h	26	7	3	10
18 h	45	10	20	30
19 h	45	5	25	30
20 h	45	5	13	18
21 h	30	20	3	23
22 h	30	2	5	7
23 h	45	30	0	30
24 h	40	25	0	25

Fonte: Adaptada da Figura 13 de Abbood, Mustafa e Ali (2013).

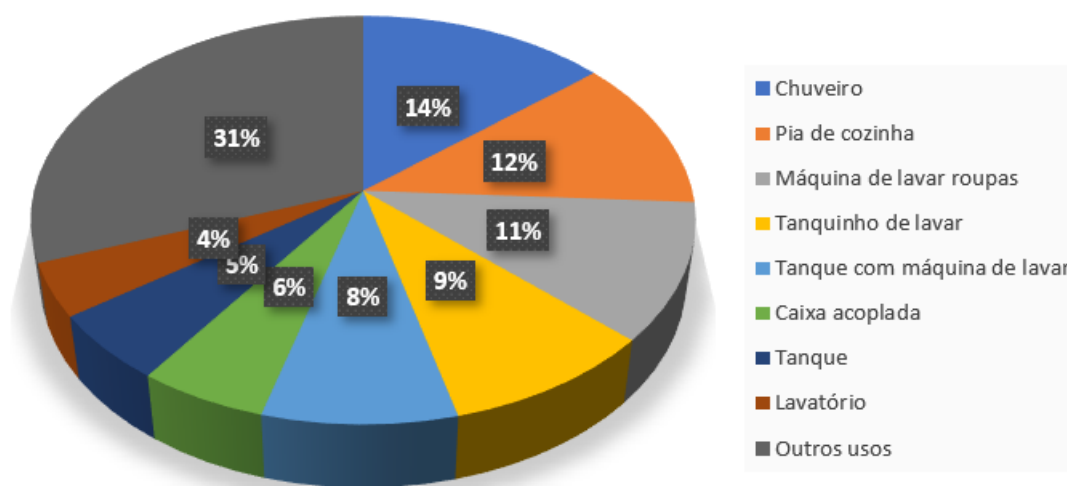
da cozinha contribuiriam com uma menor porção de 15%.

Com os dados da pesquisa de Abbood, Mustafa e Ali (2013) foi preparada a Tabela 6 que indica o consumo horário em domicílios de Bagdá por aparelho hidrossanitário.

Barreto (2008) realizou uma pesquisa sobre o levantamento do perfil de consumo residencial e usos finais da água em uma amostra de residências localizadas na zona oeste da cidade de São Paulo. Identificou, considerando os resultados da aplicação dos questionários, um número médio de três moradores por residência, o que permitiu calcular o consumo *per capita* da amostra estudada, por ponto de utilização e por morador. Em posse dos dados de consumo por residência, Barreto (2008) encontrou que o ponto de utilização de maior consumo é o chuveiro (14%), seguido sucessivamente da torneira de pia (12%), máquina de lavar roupas (11%), tanquinho (9%), torneira de tanque com máquina de lavar roupas (8%), caixa acoplada (6%), torneira de tanque (5%), e torneira de lavatório (4%). Os outros usos perfazem o restante, com 30%. Esses dados estão demonstrados na Figura 1.

O consumo médio *per capita* por ponto de utilização do banheiro está expresso na Tabela 7, considerando a média de três pessoas por residência. A média de consumo horária de

Figura 1 – Percentual de participação dos pontos de utilização no consumo diário médio.



Fonte: Adaptada da Figura 13 de Barreto (2008).

Tabela 7 – Consumo médio *per capita* por ponto de utilização no banheiro.

Ponto de utilização	Consumo (L/dia)	Consumo <i>per capita</i> (L/dia/hab.)
Chuveiro	106	35,3
Lavatório	32	10,8
Caixa acoplada	42	14,0

Fonte: Adaptada da Tabela 9 de Barreto (2008).

todas as residências por ponto de utilização (BARRETO, 2008) serviu de base para a extração dos valores apresentados na Tabela 8, correspondentes aos dados horários de água cinza gerada pelo lavatório e chuveiro, além do consumo de água do vaso sanitário.

A pesquisa de Mayer et al. (1999 apud Barreto, 2008) realizada em 12 cidades americanas sobre o perfil do consumo de água teve como foco identificar os usos finais da água. Foram monitoradas 1188 residências com data-loggers, registrando as vazões a cada 10 segundos. Os dados foram tratados em um programa específico de computador capaz de desagregar o perfil de consumo em eventos individuais de uso de água tais como uma descarga de bacia sanitária, um ciclo de máquina de lavar roupas e assim por diante. Na Figura 2 é possível notar os usos finais da água obtidos nas observações das residências em 12 cidades americanas. O perfil de consumo horário por aparelho hidrossanitário das 1188 residências é ilustrado na Figura 1 do trabalho de Barreto (2008) e, a partir dela, foi preparada a Tabela 9 com os valores da bacia sanitária, lavatório e chuveiro em volumes por residência e na unidade litro.

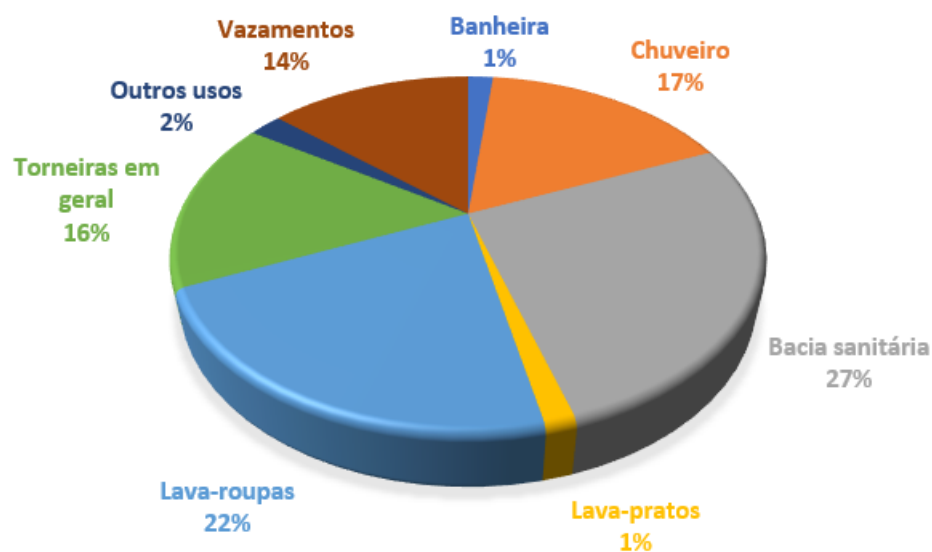
Deve-se levar em consideração que o perfil bem como o uso final da água refletiram os costumes norte-americanos de modo que não podem ser adotados para aplicação genérica. Porém, Barreto (2008) adotou como referência o modo de desagregação para se levantar o perfil do consumo e usos finais no caso brasileiro.

Tabela 8 – Dados de consumo horário por ponto de utilização do banheiro.

	Vaso sanitário (L)	Lavatório (L)	Chuveiro (L)	Água cinza (L)
01 h	2	0,5	4	4,5
02 h	4	0,5	4	4,5
03 h	0	0	1	1
04 h	1	0	0	0
05 h	0	0	0	0
06 h	0	0,5	2	2,5
07 h	2	3	3	6
08 h	1	2	10	12
09 h	6	5	3	8
10 h	1	3	4	7
11 h	3	6	1	7
12 h	2	2	6	8
13 h	4	2,5	3	5,5
14 h	1	3,5	10	13,5
15 h	2	1	2	3
16 h	0	0,5	2	2,5
17 h	3	2	2	4
18 h	2	1,5	7	8,5
19 h	5	1,5	7	8,5
20 h	2	2	10	12
21 h	0	0,5	6	6,5
22 h	2	2	3	5
23 h	1	1,5	6	7,5
24 h	4	2	10	12

Fonte: Valores estimados com base na Figura 14 de Barreto (2008).

Figura 2 – Usos finais da água por residência.



Fonte: Adaptada da Tabela 6 de Barreto (2008).

Tabela 9 – Valores médios horários por residência em usos finais convertido para a unidade litro.

	Vaso sanitário (L)	Lavatório (L)	Chuveiro (L)	Água cinza (L)
01 h	3,19	0,80	0,70	1,50
02 h	1,91	0,48	0,32	0,80
03 h	0,96	0,00	0,10	0,10
04 h	0,80	0,48	0,00	0,48
05 h	1,60	0,80	0,64	1,44
06 h	6,38	2,55	9,09	11,64
07 h	8,29	3,35	10,21	13,56
08 h	7,98	5,10	10,21	15,31
09 h	6,38	3,83	7,34	11,17
10 h	6,54	3,51	6,06	9,57
11 h	6,22	3,19	6,22	9,41
12 h	4,79	3,19	1,91	5,10
13 h	5,74	3,19	2,55	5,74
14 h	5,58	3,35	0,80	4,15
15 h	4,79	3,03	1,91	4,94
16 h	5,42	3,19	1,12	4,31
17 h	6,38	3,51	2,55	6,06
18 h	5,90	4,79	3,19	7,98
19 h	6,38	4,15	3,19	7,34
20 h	6,54	4,47	2,87	7,34
21 h	6,54	4,15	2,87	7,02
22 h	7,66	3,35	2,07	5,42
23 h	4,79	2,23	2,87	5,10
24 h	3,83	1,75	2,71	4,47

Fonte: Valores estimados com base na Figura 1 de Barreto (2008).

2.1.3 Aceitabilidade da reutilização das águas cinzas

Abbood, Mustafa e Ali (2013) realizaram uma pesquisa de satisfação com uso de questionários em relação a reutilização de águas cinzas. Os resultados mostram que na região de Rusafa a porcentagem do público que aceita a reutilização é maior do que aqueles que se opõem à reutilização, enquanto o lado Kerkh da cidade de Bagdá mostra que a porcentagem do público que aceita a reutilização é menor do que aqueles opondo-se à reutilização. O estudo mostra que a porcentagem de pessoas que se opõem ao projeto nas regiões de Rusafa e Kerkh é de 26% e 39%, respectivamente. Entre as razões para a oposição estão o provável risco para a saúde humana, possíveis maus odores, possíveis preocupações religiosas, possíveis efeitos de poluição de solos, plantas e lençóis freáticos e a possibilidade de moscas estarem presentes nas proximidades dos projetos propostos (detalhes na Tabela 10).

A análise dos dados de Abbood, Mustafa e Ali (2013) indica que as razões para aceitar a reutilização das águas cinzas incluíam os benefícios em reduzir a demanda de recursos hídricos, a provável diminuição da conta de água, a provável diminuição com custos de manutenção de fossa sépticas, a diminuição da pressão nas estações de tratamento de água e a possibilidade

Tabela 10 – Razões para oposição a reutilização de águas cinzas.

	Rusafa	Kerkh
Risco para saúde humana	47%	37%
Preocupações religiosas	23%	32%
Possíveis maus odores	18%	24%
Poluição de solo e plantas	9%	5%
Aparecimento de moscas	3%	2%

Fonte: Dados obtidos de Abbood, Mustafa e Ali (2013).

Tabela 11 – Razões para aceitar o reúso de águas cinzas.

	Rusafa	Kerkh
Reduzir demanda de recursos hídricos	26%	20%
Diminuição da conta de água	17%	25%
Redução de custo das fossas	19%	15%
Diminuição da pressão nas estações	36%	34%
Possibilidade de aumento da renda	2%	6%

Fonte: Dados obtidos de Abbood, Mustafa e Ali (2013).

Tabela 12 – Percentuais de aceitabilidade em diversos fins.

	Rusafa	Kerkh
Descarga de vaso sanitário	56%	54%
Irrigação	59%	61%
Lavagem de carros	65%	68%
Fins potáveis	2%	1%
Proteção de incêndios	7%	9%

Fonte: Dados obtidos de Abbood, Mustafa e Ali (2013).

do reúso aumentar a renda familiar. A Tabela 11 traz os dados em relação a esses fatores que foram determinantes para a aceitação dessa prática de sustentabilidade hídrica.

Abbood, Mustafa e Ali (2013) realizaram a análise do percentual de pessoas que aceitam o reúso das águas cinzas para algumas finalidades, tais como: descarga de vaso sanitário, para irrigação, para lavagem de carros, para fins potáveis após tratamento adequado e para proteção contra incêndios. A Tabela 12 traz esses dados de aceitabilidade para a população de Rusafa e Kerkh.

2.2 Dimensionamento de reservatórios

Os métodos tradicionais de dimensionamento de reservatórios se baseiam na curva de massa e na simulação. A curva de massa residual representa o diagrama de flutuações de armazenamento em um reservatório irrestrito sujeito a entradas (afluências) e saídas (demandas) (KLEMEŠ, 1979). Tipicamente, tais métodos utilizam-se de séries históricas para o cálculo do volume ideal que permita uma alocação igual à demanda, isto é, uma regularização firme em todos os intervalos de tempo. No entanto, essa garantia só é válida para a série de entradas utilizada. Para regularização

firme, os métodos de simulação e os baseados na curva de massa atingem o mesmo resultado. A vantagem do método de simulação através do balanço hídrico é utilizar a capacidade de reservatórios menores ao inserir em seus cálculos a possibilidade de falhas no atendimento à demanda. Para tal, define-se a confiabilidade (*time-based reliability*) R_T da operação por

$$R_T = 1 - F = 1 - \frac{f}{N} \quad (2.1)$$

em que F é a frequência de falhas, isto é, o número de períodos de falhas f dividido pelo horizonte de planejamento N (HASHIMOTO; STEDINGER; LOUCKS, 1982).

É possível, então, calcular uma capacidade K_a condicionada a determinada confiabilidade atribuindo-se valores sucessivos de K_a e diminuindo a capacidade a cada iteração até convergir ao valor mínimo resultando na confiabilidade exigida.

Apesar de operar com a regularização firme, os métodos baseados na curva de massa são amplamente utilizados a exemplo do método de Rippl (RIPPL, 1883), o qual analisa o diagrama de flutuações de forma regressiva desde o final da última estação seca até encontrar a maior acumulação que se torna a capacidade do reservatório.

Uma maneira alternativa ao método de Rippl é encontrar a partir da curva de massa residual a distância entre o pico e o vale durante o período de deplecionamento crítico. Esta abordagem é conhecida como análise dos picos sequenciais.

Fundamentalmente, esses métodos se utilizam apenas de uma série temporal de afluições (tipicamente, os registros históricos), ou seja, são modelos determinísticos que em sua forma original não incorporam incertezas. Uma maneira de incorporá-las seria através da geração de séries sintéticas de afluições que preservem as características estatísticas da série histórica original, por exemplo, média, desvio padrão, assimetria, autocorrelação, curtose, entre outras (CELESTE; FEITOSA; CORREIA, 2012). A partir das séries sintéticas, seria calculada a capacidade de armazenamento para cada uma delas e o valor final seria encontrado a partir da análise da distribuição empírica de probabilidades da capacidade.

Uma vez que a tarefa principal do dimensionamento de um reservatório é encontrar a capacidade mínima requerida para atender certa regularização, a otimização matemática pode ser uma ferramenta atraente para alcançar esse objetivo. Segundo Nagy, Asante-Duah e Zsuffa (2002), a maioria dos problemas de otimização requer maximizar ou minimizar uma função objetivo sujeita a um conjunto de restrições, incluindo as de domínio. Em modelos de otimização envolvendo reservatórios, a função objetivo representa uma forma de medir a qualidade da solução obtida de acordo com as restrições, estas sendo responsáveis por definir como o sistema será operado, quando e quanto de água será liberada ou o quanto dela será armazenada (SIMONOVIC, 1992). Não há um método único capaz de resolver todos os tipos de problemas de otimização de forma eficiente. Consequentemente, técnicas foram desenvolvidas ao longo das últimas décadas para resolver diferentes formulações (RAO, 2009), algumas das mais utilizadas sendo a programação linear, não linear e dinâmica (NAGY; ASANTE-DUAH; ZSUFFA, 2002).

3 Material e Métodos

3.1 Modelo de otimização

Em seu trabalho de mestrado (em andamento) no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe (PROEC/UFS), Lima (2021) vem implementando um novo modelo de otimização linear inteira mista para dimensionamento de reservatórios de abastecimento (modelo ARCOSOP) que incorpora indicadores de confiabilidade e de vulnerabilidade, além de considerar as incertezas hidrológicas. A confiabilidade é calculada pela equação 2.1 e a vulnerabilidade representa a magnitude de uma falha (déficit em relação à demanda). Para tal, a autora procurou aprimorar o modelo de dimensionamento ARCO (CELESTE, 2015) incorporando a política de operação padrão de reservatórios (SOP: *standard operating policy*, segundo a qual a demanda deve ser atendida sempre que possível) e considerando a estocasticidade hidrológica, não testada previamente no modelo ARCO. Além disso, foi realizada a comparação do modelo ARCOSOP com métodos tradicionais de dimensionamento de reservatórios e verificada a influência da abordagem estocástica em comparação com a determinística.

Apesar do ARCOSOP ter sido originalmente formulado para reservatórios de barragens que utilizam séries de vazões em cursos d'água, o método pode ser adaptado sem maiores problemas para o dimensionamento de reservatórios de águas cinzas aplicando-se os mesmos princípios que inclui a utilização da estocasticidade.

O ARCOSOP é um problema de programação linear inteira mista (MILP: *mixed-integer linear program*). Neste trabalho, apenas o indicador confiabilidade foi considerado e, portanto, o ARCOSOP original foi modificado para remover a influência da vulnerabilidade. Dessa forma, o modelo objetiva encontrar a capacidade mínima de armazenamento K_a para atender uma dada demanda perante um cenário de entradas (influxos, afluências) sujeito a um valor de confiabilidade mínima $R_T^{\min}$ previamente assumido. Além de $R_T^{\min}$, os únicos dados a serem inseridos no modelo são a série temporal de entradas I_t ($t = 1, \dots, N$) e a demanda D_t para cada período de tempo t . O valor de $R_T^{\min}$ implica na estimativa do número máximo permitido de falhas, $f_{\max} = (1 - R_T^{\min}) N$ (ver equação 2.1). A formulação final utilizada é mostrada a seguir.

$$\text{minimizar } K_a \tag{3.1}$$

sujeito a

$$S_t = S_{t-1} + I_t - R_t - Sp_t \quad \forall t, S_0 = S_N \quad (3.2)$$

$$K_a = S_{t-1} + I_t - D_t - Sp_t + Z_t \quad \forall t, S_0 = S_N \quad (3.3)$$

$$(1 - \beta_t) D_t \leq R_t \leq D_t \quad \forall t \quad (3.4)$$

$$\sum_{t=1}^N \beta_t \leq f_{\max} \quad (3.5)$$

$$Z_t - \mathcal{M} \cdot B_t \leq 0 \quad \forall t \quad (3.6)$$

$$Sp_t + \mathcal{M} \cdot B_t \leq \mathcal{M} \quad \forall t \quad (3.7)$$

$$R_t + v_t = S_{t-1} + I_t \quad \forall t, S_0 = S_N \quad (3.8)$$

$$R_t + u_t = D_t \quad \forall t \quad (3.9)$$

$$u_t - \mathcal{M} \cdot b_t \leq 0 \quad \forall t \quad (3.10)$$

$$v_t + \mathcal{M} \cdot b_t \leq \mathcal{M} \quad \forall t \quad (3.11)$$

$$0 \leq S_t \leq K_a \quad \forall t \quad (3.12)$$

$$K_a, Sp_t, Z_t, u_t, v_t \geq 0 \quad \forall t \quad (3.13)$$

$$\beta_t, B_t, b_t = 0 \text{ or } 1 \quad \forall t \quad (3.14)$$

em que S_t é o armazenamento do reservatório no final do período de tempo t ; R_t é a alocação a partir do reservatório no tempo t ; Sp_t é o eventual vertimento (extravasamento) durante o tempo t ; Z_t é o deplecionamento de volume do reservatório (em relação à sua capacidade) no tempo t ; β_t é uma variável binária que representa uma falha de abastecimento da forma:

- $\beta_t = 1$ (falha): a restrição 3.4 torna-se $0 \leq R_t \leq D_t$ e, portanto, a alocação pode ser menor do que a demanda;
- $\beta_t = 0$ (sem falha): a restrição 3.4 torna-se $D_t \leq R_t \leq D_t \Rightarrow R_t = D_t$ e, portanto, a alocação atende à demanda;

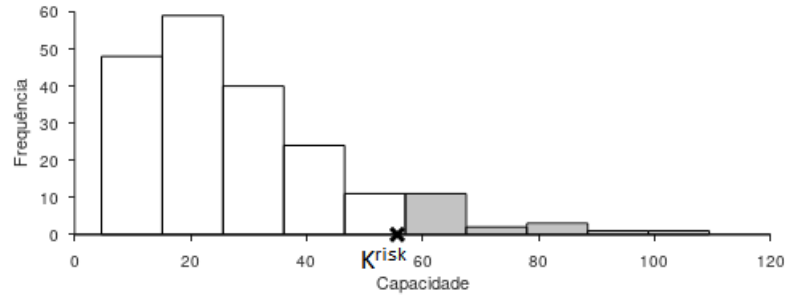
e as variáveis auxiliares $\mathcal{M}$ (grande número positivo), u_t , v_t , B_t e b_t servem para forçar o modelo a utilizar a SOP (restrições 3.8–3.11) e para linearizar restrições originalmente não lineares (detalhes em Lima (2021)). A restrição 3.5 garante que a soma de todos os β_t , ou o número total de falhas, não exceda $f_{\max}$, a fim de cumprir o requisito de confiabilidade mínima.

O ARCOSOP é implementado no ambiente de programação GNU Octave (<<https://www.gnu.org/software/octave/>>) e resolvido por meio do pacote numérico GNU *Linear Programming Kit* (GLPK) (<<https://www.gnu.org/software/glpk/>>), ambos softwares de código livre.

3.2 Abordagem estocástica

Para incorporar estocasticidade ao ARCOSOP foi utilizado um procedimento de Monte Carlo, onde são aplicados dois estágios, a “dimensionamento” e a “validação, cujos passos são listados

Figura 3 – Representação do histograma de frequência da capacidade indicando que K_a^{risk} é escolhida de forma que $\mathbb{P}(K_a > K_a^{\text{risk}}) = \text{RISK}$, que corresponde a área sombreada.



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

abaixo (seguindo o indicado por Lima (2021)):

- Estágio de dimensionamento:
 1. Gerar n_d cenários de entradas (chamados de cenários de “dimensionamento”), cada um com comprimento N , através de um modelo estatístico, tomando como base a série original de influxos;
 2. Usar o ARCOSOP para determinar a capacidade ótima perante cada cenário de gerado;
 3. Determinar a função de frequência relativa ou absoluta (histograma) da capacidade (FFC: *frequency function of capacity*) a partir dos dados obtidos no passo 2;
 4. Usar a FFC para determinar a capacidade final do reservatório. Para isso, assumir um risco a ser tomado igual probabilidade de subdimensionar a capacidade. A capacidade útil final, chamada K_a^{risk} , é então calculada a partir da FFC (ver Figura 3) tal que

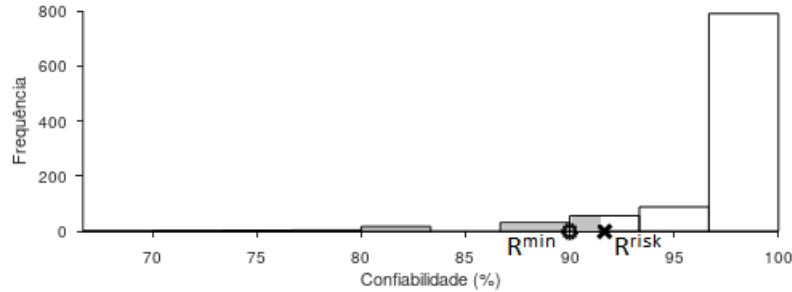
$$\mathbb{P}(K_a > K_a^{\text{risk}}) = \text{RISK} \quad (3.15)$$

onde $\mathbb{P}()$ indica probabilidade (estimada aqui pela frequência) e RISK é o risco assumido. Desse modo, a capacidade escolhida é aquela em que a probabilidade de serem necessárias capacidades maiores do que ela é igual ao risco assumido, i.e., o risco de subdimensionar.

Esse procedimento trata do dimensionamento da capacidade final perante risco e confiabilidade predeterminados. Aqui, foram utilizados $n_d = 200$ cenários de dimensionamento, cada um com comprimento $N = 24$, correspondente as horas do dia.

- Estágio de validação:
 1. Gerar n_v cenários de entradas (chamados de cenários de “validação”), cada um com comprimento N , através de um modelo através de um modelo estatístico,

Figura 4 – Representação do histograma de frequência da confiabilidade indicando que R_T^{risk} é escolhida de forma que $\mathbb{P}(R_T \leq R_T^{\text{risk}}) = \text{RISK}$, que corresponde a área sombreada da figura. Se $R_T^{\text{min}} \leq R_T^{\text{risk}}$, então $\mathbb{P}(R_T < R_T^{\text{min}})$ é menor do que o risco assumido, validando a capacidade escolhida do reservatório.



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

tomando como base a série original de influxos. Estes são diferentes dos cenários de dimensionamento;

2. Operar o reservatório assumindo K_a^{risk} como a capacidade em cada cenário de influxos e calcular a confiabilidade R_T para cada operação;
3. Determinar a função de frequência da confiabilidade (FFR: *frequency function of reliability*) através dos resultados obtidos no passo anterior;
4. A partir da FFR (ver Figura 4), estimar a confiabilidade R_T^{risk} tal que

$$\mathbb{P}(R_T \leq R_T^{\text{risk}}) = \text{RISK} \quad (3.16)$$

5. A partir dos resultados obtidos no passo 2, estimar o risco real (*real risk*) de violar a R_T^{min} previamente definida. Esse valor é denominado REALR e calculado de modo que

$$\mathbb{P}(R_T < R_T^{\text{min}}) = \text{REALR} \quad (3.17)$$

6. A capacidade K_a^{risk} estimada durante o dimensionamento é, portanto, validada se $R_T^{\text{min}} \leq R_T^{\text{risk}}$ (ver Figura 4) ou, alternativamente, se $\text{REALR} \leq \text{RISK}$.

Esse procedimento tem como objetivo confirmar que a capacidade escolhida não violará a confiabilidade sob o risco assumido quando o reservatório for operado para diversos cenários futuros de vazão. Nessa pesquisa, foram utilizados $n_v = 1000$ cenários de validação, cada um com comprimento $N = 24$, correspondente as horas do dia.

3.3 Tratamento dos dados

Como, por conta do tempo da pesquisa, não foi possível fazer levantamento de dados muito abrangentes, optou-se por trabalhar com dados de produção de águas cinzas e de consumo do vaso sanitário em função das horas obtidos da literatura. Sendo assim, foi realizado o

dimensionamento levando-se em consideração os dados obtidos pelas pesquisas de Abbood, Mustafa e Ali (2013), Barreto (2008) e Mayer et al. (1999 apud Barreto, 2008). Os dados desses trabalhos consideraram a geração horária por residência, porém desses dados não foi possível obter o desvio padrão diário e tampouco o desvio padrão horário (necessários na geração dos cenários sintéticos). Como esta pesquisa tem o objetivo de dimensionar um reservatório de águas cinzas em função dos usos horários finais dos aparelhos hidrossanitários através da incorporação da estocasticidade, foi necessário valer-se de artifícios matemáticos para atingir tal fim.

Primeiramente, é necessário relembrar que para a geração das séries sintéticas é fundamental que sejam conhecidos médias e desvios padrões nas variáveis em análise como é definido na formulação matemática a seguir

$$x = \mu + \sigma \cdot \epsilon \quad (3.18)$$

onde x é a variável aleatória em estudo (neste caso, o influxo e a demanda), μ e σ são, respectivamente, sua média e desvio padrão, e ϵ é uma variável aleatória¹ de média zero e variância unitária.

No trabalho de Menezes, Magalhães Filho e Loureiro (2011) foram encontrados desvios padrões por aparelho hidrossanitário presentes na Tabela 4. Como esses desvios padrões são diários, coube a adequação matemática para chegar a relação do desvio padrão horário buscado. Em cada hora do dia t ($t = 1, \dots, 24$), tem-se

$$x_t = \mu_t + \sigma \cdot \epsilon_t \quad (3.19)$$

assumindo-se aqui um desvio padrão σ constante em cada hora. O total diário x_d de x é, portanto,

$$x_d = \sum_{t=1}^{24} x_t = \sum_{t=1}^{24} (\mu_t + \sigma \cdot \epsilon_t) = \sum_{t=1}^{24} \mu_t + \sigma \sum_{t=1}^{24} \epsilon_t \quad (3.20)$$

Assim, a média μ_d do valor diário calculada para um total de n_c cenários é igual a soma da variável x_d^k em cada cenário $k = 1, \dots, n_c$ dividida pelo número de cenários:

$$\mu_d = \frac{1}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} x_d^k = \frac{1}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} \left(\sum_{t=1}^{24} \mu_t + \sigma \sum_{t=1}^{24} \epsilon_t \right) \quad (3.21)$$

Similarmente, a variância σ_d^2 do valor diário calculado para um total de n_c cenários vale

$$\sigma_d^2 = \frac{1}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} \left(x_d^k - \mu_d \right)^2 \quad (3.22)$$

que, substituindo-se as expressões anteriores, torna-se

$$\sigma_d^2 = \frac{\sigma^2}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} \left(\sum_{t=1}^{24} \epsilon_t^k - \frac{1}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} \sum_{t=1}^{24} \epsilon_t^k \right)^2 \quad (3.23)$$

¹ Assumindo uma distribuição gaussiana, i.e., ϵ é uma variável aleatória normal padrão.

Definindo-se o somatório $S_\epsilon^k = \sum_{t=1}^{24} \epsilon_t^k$, a variância σ_d^2 pode ser escrita da forma

$$\sigma_d^2 = \frac{\sigma^2}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} (S_\epsilon^k - \mu_{S_\epsilon})^2 \quad (3.24)$$

em que $\mu_{S_\epsilon} = \frac{1}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} S_\epsilon^k$ é a média da variável S_ϵ para o total de n_c cenários. Uma vez que a variância de S_ϵ vale $\sigma_{S_\epsilon}^2 = \frac{1}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} (S_\epsilon^k - \mu_{S_\epsilon})^2$, a equação 3.24 é simplificada por

$$\sigma_d^2 = \sigma^2 \cdot \sigma_{S_\epsilon}^2 \quad (3.25)$$

Visto que $S_\epsilon^k = \sum_{t=1}^{24} \epsilon_t^k$ e sendo as variáveis ϵ_t ($t = 1, \dots, 24$) independentes, a variância de S_ϵ pode ser calculada pela soma das variâncias de ϵ_t :

$$\sigma_{S_\epsilon}^2 = \sum_{t=1}^{24} \sigma_{\epsilon_t}^2 = 1 + \dots + 1 = 24 \quad (3.26)$$

já que cada ϵ_t tem variância unitária. Isso e a equação 3.25 dão condições para se estimar, portanto, o desvio padrão horário σ a partir do desvio diário σ_d e do desvio de S_ϵ :

$$\sigma = \frac{\sigma_d}{\sigma_{S_\epsilon}} = \frac{\sigma_d}{\sqrt{24}} \quad (3.27)$$

Os desvios padrões na Tabela 4 são per capita, ou seja, não consideram o que ocorre em uma residência, por exemplo, em que a geração horária de todos os contribuintes são somadas. Algebricamente, multiplicar um conjunto de dados x_t por um número de pessoas NP gera uma alteração no desvio padrão proporcionalmente, como segue.

Seja a variável z definida por $z_t = NP \cdot x_t$. A sua média para um total de n valores será

$$\mu_z = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n z_t = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (NP \cdot x_t) = NP \cdot \mu \quad (3.28)$$

onde μ é a média de x . Adicionalmente, a variância σ_z^2 de z será

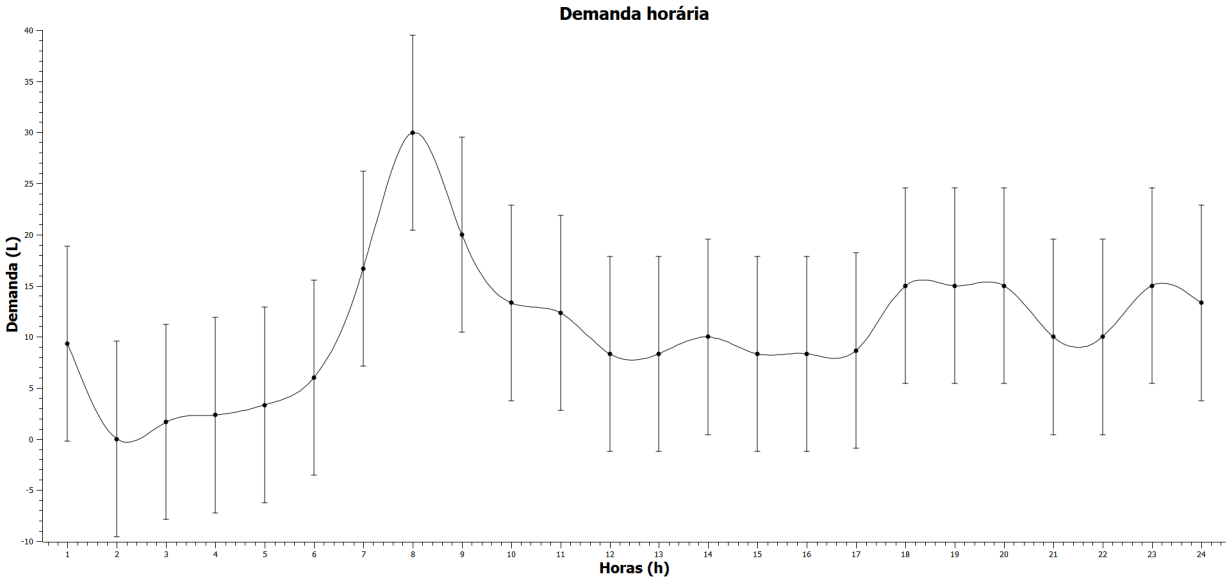
$$\begin{aligned} \sigma_z^2 &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (z_t - \mu_z)^2 \\ &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (NP \cdot x_t - NP \cdot \mu)^2 \\ &= NP^2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \mu)^2 \\ &= NP^2 \cdot \sigma^2 \end{aligned} \quad (3.29)$$

que permite calcular o desvio padrão de z a partir do correspondente desvio de x :

$$\sigma_z = NP \cdot \sigma \quad (3.30)$$

A Figura 5 representa os dados de consumo de água pelo vaso sanitário da pesquisa de Abbood, Mustafa e Ali (2013), onde foi feito o tratamento do desvio padrão diário para encontrar o desvio padrão horário para a residência padrão de quatro moradores.

Figura 5 – Demanda horária de água com representação dos desvios padrões horários.



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

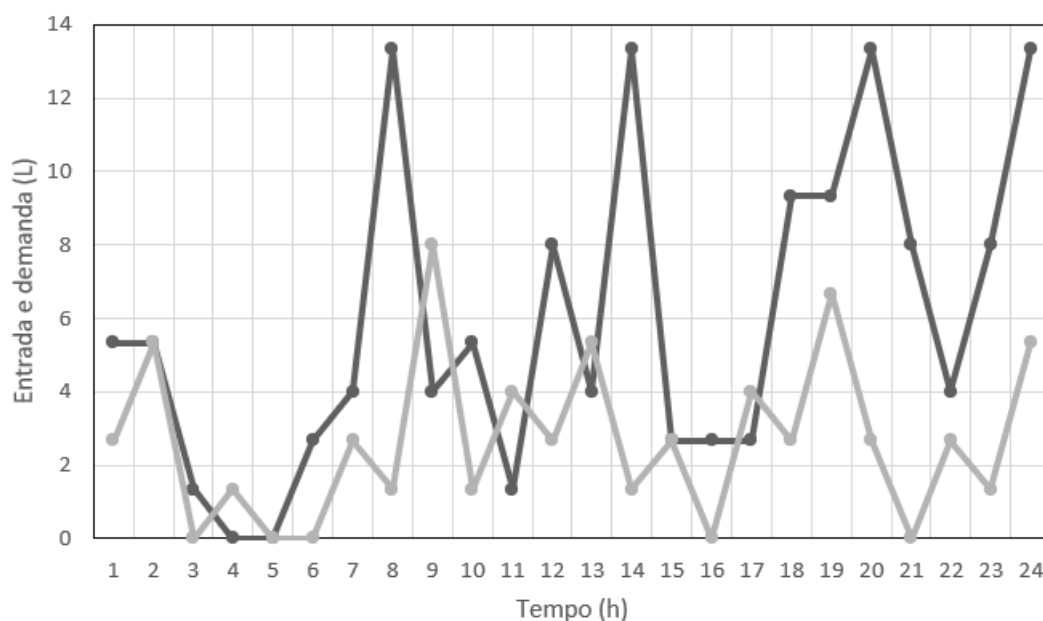
4 Resultados e Discussão

4.1 Estudo de caso EC#1: dados brasileiros

Como pontuado no Capítulo 3, para o dimensionamento do volume de um reservatório foram analisados os dados de três pesquisas. A primeira delas (BARRETO, 2008) apresenta dados de estudo de caso em residência brasileira, chamado aqui de EC#1. Os dados de usos finais horários dos aparelhos hidrossanitários dessa residência estão presente na Tabela 8. Foi considerada na pesquisa de Barreto (2008) uma residência com três moradores, porém no sentido de unificar com os outros trabalhos foi assumida nesta pesquisa uma residência padrão que recebesse uma contribuição de quatro pessoas. Esses dados diferenciaram-se dos contidos nas outras pesquisas pela significativa contribuição de águas cinzas provenientes do chuveiro da residência. Logo, não seria necessário a contribuição do lavatório do banheiro para operar a demanda do vaso sanitário. Os dados, feita a modificação aqui mencionada e somente com a utilização do chuveiro, estão presentes na Tabela 13. O gráfico que demonstra a variação horária das séries de entrada e demanda do reservatório está presente na Figura 6.

Com o intuito de realizar o dimensionamento de forma estocástica, foi realizada a geração de séries sintéticas de dimensionamento e de validação a partir dos dados médios horários da Tabela 13 considerando os desvios padrões da Tabela 4. O programa ARCOSOP também gera a saída de forma determinística, ou seja, utilizando apenas um cenário de entrada,

Figura 6 – EC#1: Série de entradas (preto) e demandas (cinza) utilizadas para o dimensionamento.



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Tabela 13 – EC#1: Dados de consumo horário utilizados no dimensionamento.

	Chuveiro (L)	Vaso sanitário (L)
01 h	5,33	2,67
02 h	5,33	5,33
03 h	1,33	0,00
04 h	0,00	1,33
05 h	0,00	0,00
06 h	2,67	0,00
07 h	4,00	2,67
08 h	13,33	1,33
09 h	4,00	8,00
10 h	5,33	1,33
11 h	1,33	4,00
12 h	8,00	2,67
13 h	4,00	5,33
14 h	13,33	1,33
15 h	2,67	2,67
16 h	2,67	0,00
17 h	2,67	4,00
18 h	9,33	2,67
19 h	9,33	6,67
20 h	13,33	2,67
21 h	8,00	0,00
22 h	4,00	2,67
23 h	8,00	1,33
24 h	13,33	5,33

Fonte: Elaborada durante a pesquisa com base nos dados de Barreto (2008).

Tabela 14 – Configuração para teste.

Risco (RISK, %)	Confiabilidade mínima ($R_T^{\min}$, %)
10	60
7	70
5	80
3	90
1	100

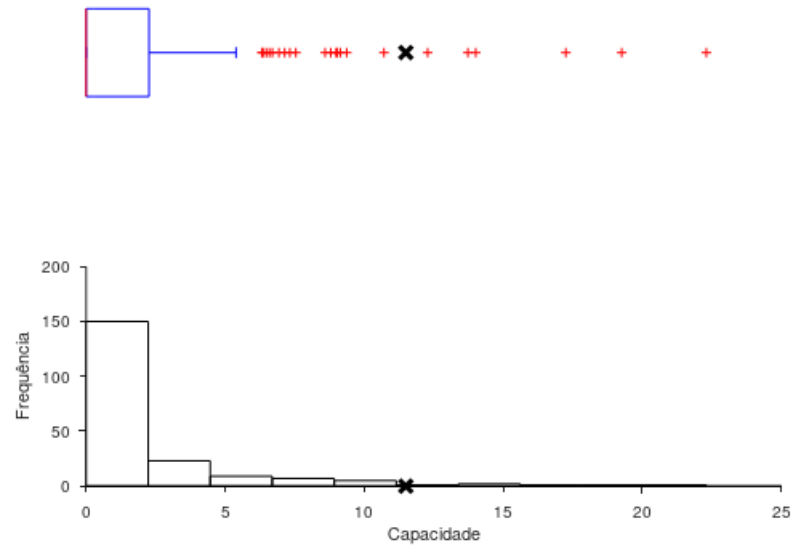
Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

sem considerar as incertezas. Essa saída determinística é realizada imitando-se o método de Rippl, i.e., adotando-se $R_T^{\min} = 100\%$, para que não ocorram falhas de atendimento à demanda.

Com o objetivo de analisar o comportamento dos resultados obtidos pelo programa, foi proposta a realização de experimentos nos quais variaram-se a confiabilidade mínima e o risco predefinido. No total, foram realizados 25 experimentos a partir da configuração presente na Tabela 14.

Como explicado no Capítulo 3, a etapa de dimensionamento compreende o dimensionamento do reservatório obedecendo valores predefinidos de confiabilidade mínima e risco

Figura 7 – EC#1: Distribuição de probabilidade e gráfico boxplot para a capacidade (em litros).



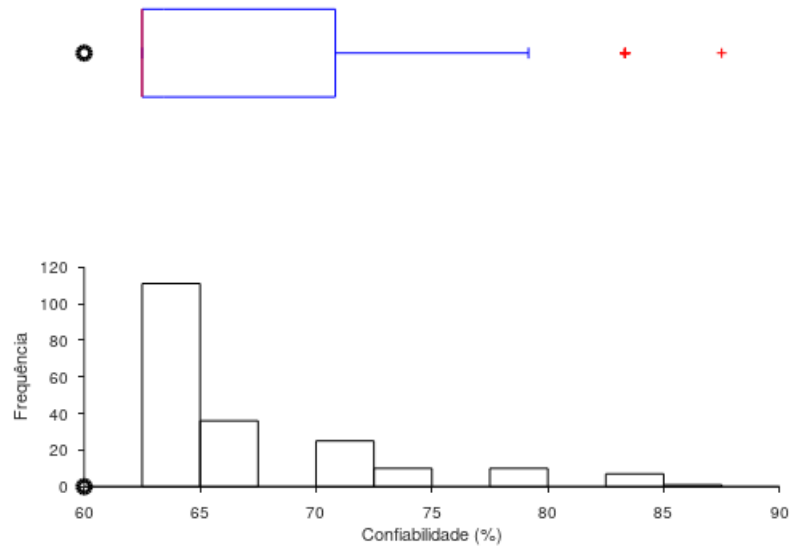
Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

e, posteriormente, é realizada a validação, onde a partir da capacidade encontrada é operado o reservatório perante 1000 cenários de séries sintéticas. Os 1000 valores de confiabilidade encontrados de todas as operações permitem a construção do histograma da confiabilidade (FFR), a partir do qual é extraído o valor de confiabilidade para o risco definido previamente, R_T^{risk} . Caso essa confiabilidade seja superior a inicialmente proposta está confirmado que o programa executou o dimensionamento conforme o esperado, o que significa que o risco real, ou seja, o risco para a confiabilidade mínima definida é inferior ao risco proposto como entrada para o programa.

Como exemplo, para a entrada de $R_T^{\text{min}} = 60\%$ e $\text{RISK} = 3\%$ foram encontrados que a capacidade do reservatório dimensionado de forma determinística é de apenas 4,00 litros, valor bem abaixo dos 11,49 litros encontrados no dimensionamento considerando incertezas. Essa capacidade encontrada de forma estocástica é confirmada a partir da etapa de validação que encontra o valor de 62,50% para a confiabilidade e 2,60% para o risco real. Conforme explicado anteriormente, esse resultado é condizente pois a confiabilidade após a operação dos 1000 cenários é superior a confiabilidade mínima, assim como o risco real é inferior ao risco predefinido. Para este exemplo, o gráfico da função de frequência da capacidade (FFC) está expresso na Figura 7, em que o símbolo $\times$ representa a capacidade encontrada perante o risco de excedência predefinido. A Figura 8 demonstra a distribuição de frequência da confiabilidade na etapa de dimensionamento do programa. Para a etapa de validação é encontrado a Figura 9, que expressa que $R_T^{\text{min}} \leq R_T^{\text{risk}}$, ou seja, a confiabilidade após a validação é igual ou superior a confiabilidade mínima predefinida.

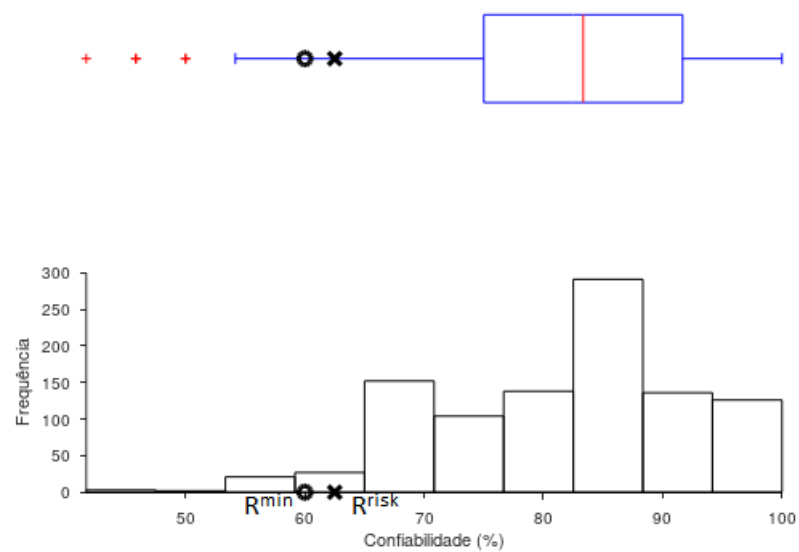
Realizando o mesmo procedimento para as 25 possibilidades de entrada expressas na Tabela 14, têm-se os resultados de capacidade presentes na Tabela 15. Com os resultados de todas as simulações realizadas, foi possível obter gráficos que relacionam as variáveis

Figura 8 – EC#1: Distribuição de probabilidade e gráfico boxplot para a confiabilidade na etapa de dimensionamento.



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Figura 9 – EC#1: Distribuição de probabilidade da confiabilidade na etapa de validação.



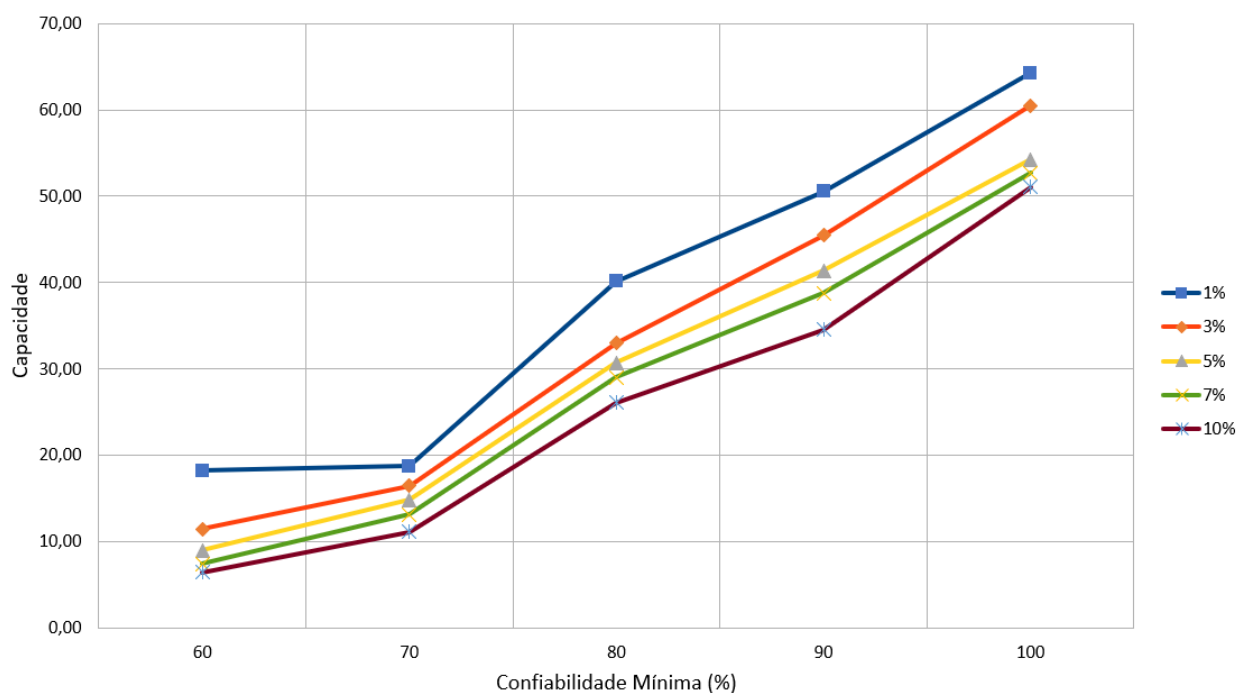
Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Tabela 15 – EC#1: Capacidades (em litros) encontradas para as entradas propostas.

$R_T^{\min}(\%)$	RISK(%)				
	1	3	5	7	10
60	18,25	11,49	9,01	7,43	6,42
70	18,77	16,49	14,85	13,12	11,15
80	40,17	32,99	30,68	28,99	26,11
90	50,57	45,47	41,38	38,79	34,54
100	64,27	60,53	54,24	52,68	51,10

Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Figura 10 – EC#1: Capacidade (em litros) vs. confiabilidade perante risco constante (as curvas correspondem a cada valor de risco segundo a legenda mostrada).

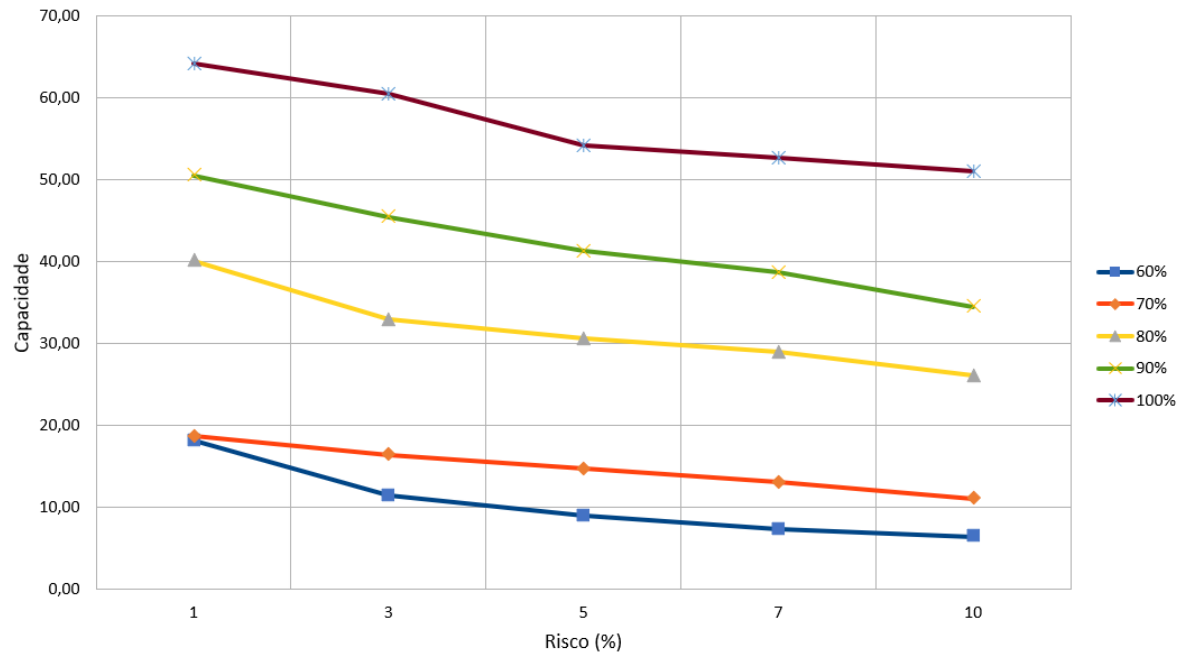


Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

envolvidas. O primeiro deles é mostrado na Figura 10, onde o risco está constante e a capacidade e confiabilidade variam. Esse gráfico indica que a capacidade aumenta com o aumento da confiabilidade mínima assumida e, para a mesma confiabilidade, a capacidade aumenta com o declínio do risco assumido. O segundo gráfico na Figura 11 possui a confiabilidade mínima constante e o risco e a capacidade variam. Esse gráfico demonstra que a capacidade diminui com o aumento do risco assumido e, para o mesmo risco, a capacidade aumenta com o aumento da confiabilidade mínima assumida.

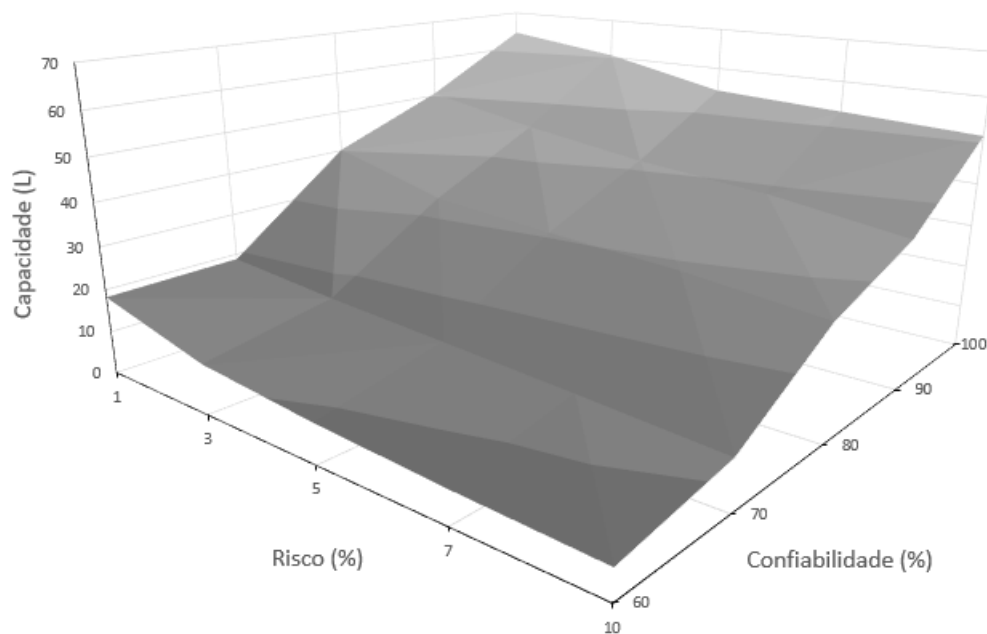
O gráfico tridimensional presente na Figura 12 relaciona as variáveis capacidade, confiabilidade e risco de modo que é notório inferir que a capacidade aumenta na medida em que a confiabilidade desejada é alta e o risco assumido é pequeno.

Figura 11 – EC#1: Capacidade (em litros) vs. risco perante confiabilidade constante (as curvas correspondem a cada valor de confiabilidade segundo a legenda mostrada).



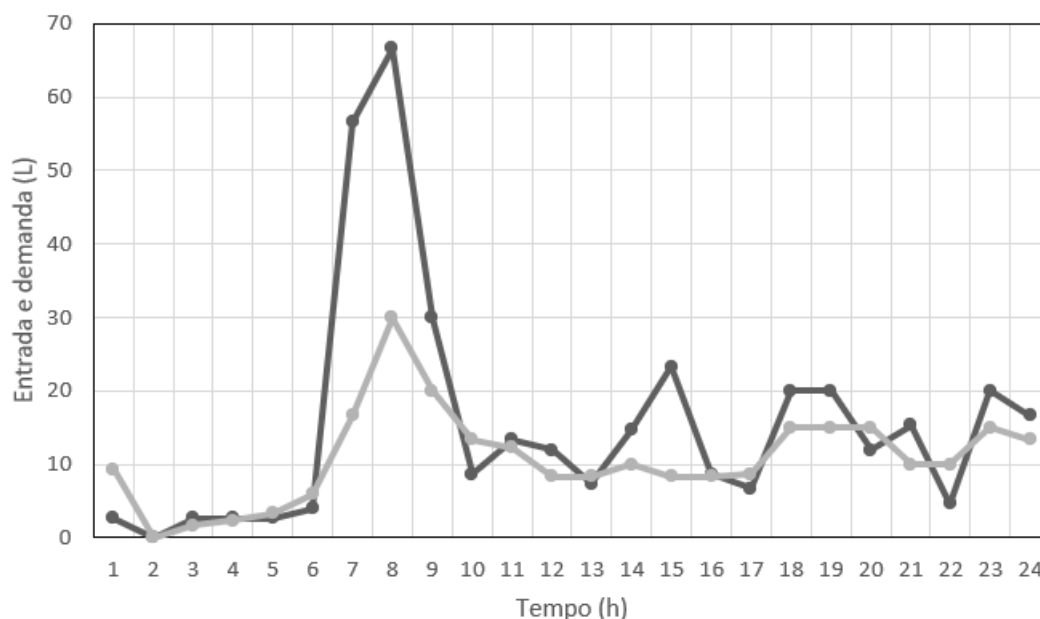
Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Figura 12 – EC#1: Capacidade vs. confiabilidade e risco.



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Figura 13 – EC#2: Série de entradas (preto) e demandas (cinza) utilizadas para o dimensionamento.



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

4.2 Estudo de caso EC#2: dados iraquianos

A pesquisa de Abbood, Mustafa e Ali (2013) trouxe dados de usos finais de aparelhos hidrosanitários que foram utilizados aqui com o objetivo de dimensionar um reservatório capaz de obedecer a uma demanda variável de consumo pela descarga do vaso sanitário. Os dados coletados estão presentes na Tabela 6. Após comparação feita com dados de consumo presentes na Tabela 4 (retirados do trabalho de Menezes, Magalhães Filho e Loureiro (2011)), notou-se elevada discrepância com o consumo do vaso sanitário e com isso optou-se por considerar nessa pesquisa 50% desse consumo. Essa discrepância pode ser explicado pelas diferenças culturais e de hábito entre os habitantes da região de Bagdá e o público alvo da pesquisa brasileira. Além disso, foi feita a modificação para que seja obedecida a quantidade de quatro pessoas por residência. Essa modificação levou em consideração a quantidade estimada de seis moradores por residência, pois foram coletados dados de 575 domicílios e de 3128 pessoas resultando em uma média de 5,59 pessoas por residência. Logo, estimou-se o consumo para uma residência padrão de quatro pessoas.

Diferentemente dos dados encontrados por Barreto (2008), na pesquisa de Abbood, Mustafa e Ali (2013) a utilização do vaso sanitário é mais significativa, levando-se a necessidade de utilizar as contribuições de águas cinzas do chuveiro e do lavatório para realizar o dimensionamento. Com isso, e após feitas as modificações apresentadas anteriormente, obteve-se a Tabela 16 com os valores utilizados para o dimensionamento. O gráfico que demonstra a variação horária das séries de entradas e demandas do reservatório está presente na Figura 13, onde a série de entradas é composta pelo somatório das parcelas do chuveiro e do lavatório.

Tabela 16 – EC#2: Dados de consumo horário utilizados no dimensionamento.

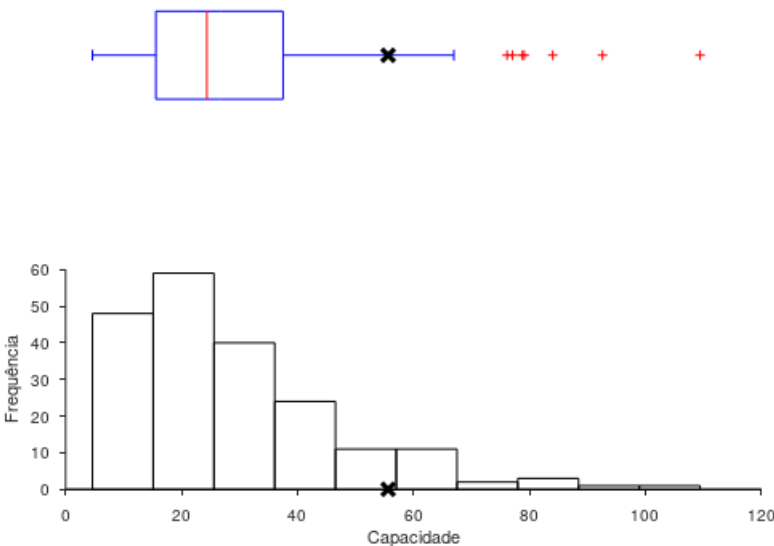
	Chuveiro (L)	Lavatório (L)	Vaso sanitário (L)
01 h	1,33	1,33	9,32
02 h	0	0	0
03 h	1,33	1,33	1,67
04 h	1,33	1,33	2,33
05 h	1,33	1,33	3,33
06 h	2,66	1,33	5,99
07 h	33,3	23,31	16,65
08 h	39,96	26,64	29,97
09 h	16,65	13,32	19,98
10 h	1,99	6,66	13,32
11 h	3,33	9,99	12,32
12 h	6,66	5,33	8,33
13 h	1,99	5,33	8,33
14 h	1,33	13,32	9,99
15 h	9,99	13,32	8,33
16 h	1,99	6,66	8,33
17 h	1,99	4,66	8,66
18 h	13,32	6,66	14,99
19 h	16,65	3,33	14,99
20 h	8,66	3,33	14,99
21 h	1,99	13,32	9,99
22 h	3,33	1,33	9,99
23 h	0	19,98	14,99
24 h	0	16,65	13,32

Fonte: Elaborada durante a pesquisa com base nos dados de Abbood, Mustafa e Ali (2013).

Para a realização do dimensionamento foi utilizado o mesmo procedimento feito para o EC#1. Utilizou-se as incertezas dos valores médios ao serem inseridos os desvios padrões por aparelho hidrossanitário presentes na Tabela 4. Como exemplo, para a entrada de $R_T^{\min} = 90\%$ e $RISK = 10\%$ foram encontrados que a capacidade do reservatório dimensionado de forma determinística é de apenas 7,99 litros, valor bem abaixo dos 55,63 litros encontrados no dimensionamento de forma estocástica. Essa capacidade encontrada considerando as incertezas é confirmada a partir da etapa de validação que fornece o valor de 91,67% para a confiabilidade e 6,30% para o risco real. Conforme explicado anteriormente, esse resultado é condizente pois a confiabilidade após a operação dos 1000 cenários é superior a confiabilidade mínima, assim como o risco real é inferior ao risco predefinido. Para este exemplo, o gráfico da função de frequência da capacidade (FFC) está expresso na Figura 14. A Figura 15 demonstra a distribuição de frequência da confiabilidade na etapa de dimensionamento do programa. Para a etapa de validação foi construída a Figura 16, que expressa que $R_T^{\min} \leq R_T^{\text{risk}}$, ou seja, a confiabilidade após a validação é igual ou superior a confiabilidade mínima predefinida.

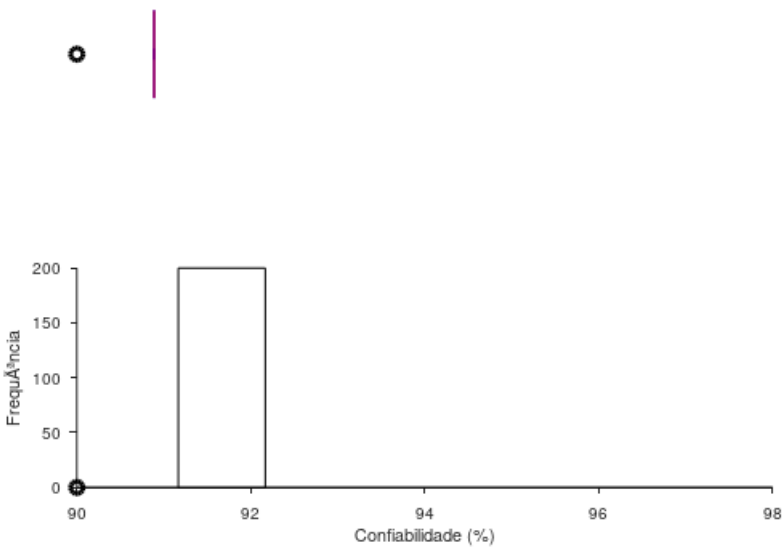
Realizando o mesmo procedimento para as 25 possibilidades de entrada expressas na Tabela 14, têm-se os resultados de capacidade presentes na Tabela 17. Com os resultados

Figura 14 – EC#2: Distribuição de probabilidade e gráfico boxplot para a capacidade (em litros).



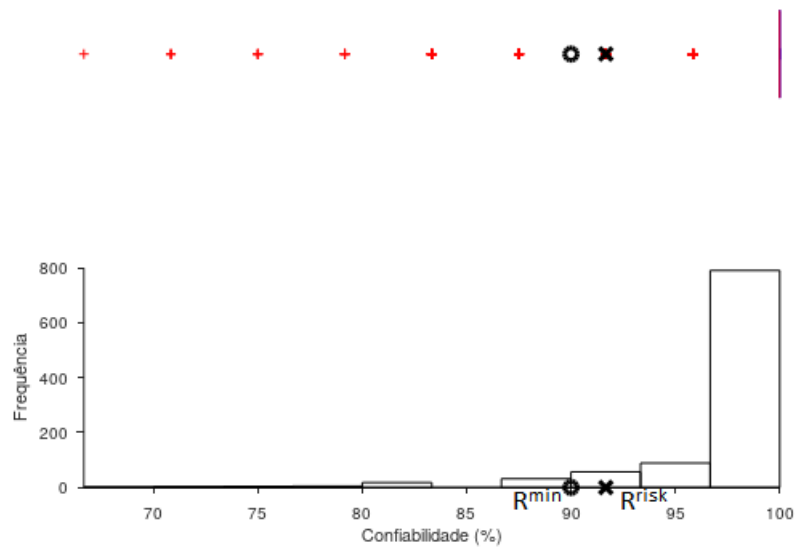
Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Figura 15 – EC#2: Distribuição de probabilidade e gráfico boxplot para a confiabilidade.



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Figura 16 – EC#2: Distribuição de probabilidade da confiabilidade na etapa de validação.



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Tabela 17 – EC#2: Capacidades (em litros) encontradas para as entradas propostas.

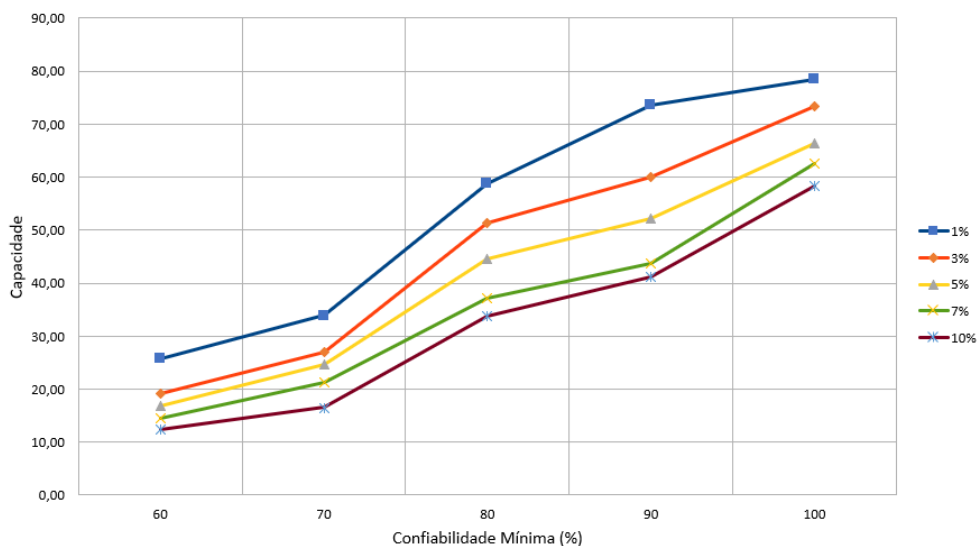
$R_T^{\min}(\%)$	RISK(%)				
	1	3	5	7	10
60	25,73	19,15	16,89	14,59	12,35
70	33,87	26,96	24,73	21,27	16,51
80	58,84	51,33	44,62	37,25	33,79
90	73,53	59,92	52,24	43,62	41,14
100	78,47	73,28	66,47	62,58	58,35

Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

de todas as simulações realizadas, foi possível obter gráficos que relacionam as variáveis envolvidas. O primeiro deles é mostrado na Figura 17, onde o risco está constante e a capacidade e confiabilidade variam. Esse gráfico indica que a capacidade aumenta com o aumento da confiabilidade mínima assumida e, para a mesma confiabilidade, a capacidade aumenta com o declínio do risco assumido. O segundo gráfico na Figura 18 possui a confiabilidade mínima constante e o risco e a capacidade variam. Esse gráfico demonstra que a capacidade diminui com o aumento do risco assumido e, para o mesmo risco, a capacidade aumenta com o aumento da confiabilidade mínima assumida.

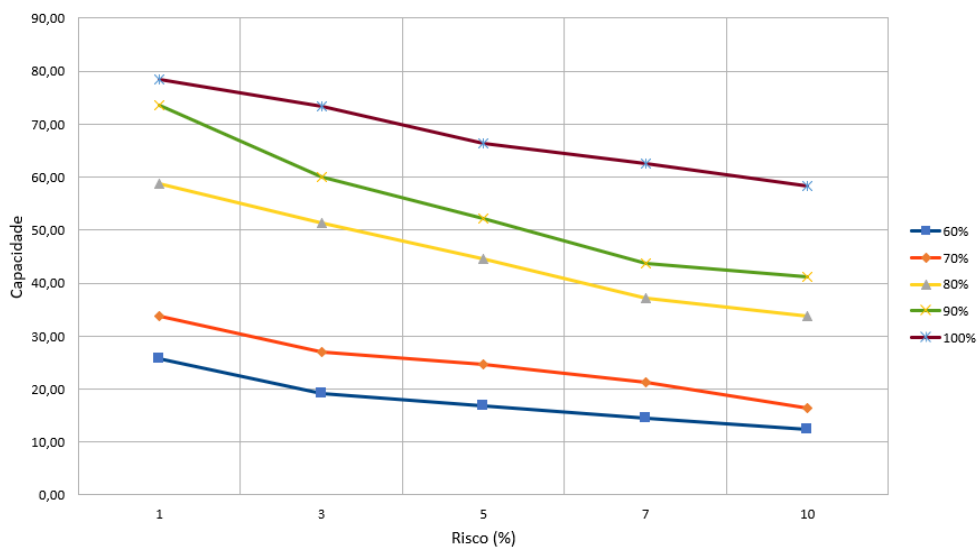
O gráfico tridimensional presente na Figura 19 relaciona as variáveis capacidade, confiabilidade e risco de modo que é notório inferir, assim como no EC#1, que a capacidade aumenta na medida em que a confiabilidade desejada é alta e o risco assumido é pequeno.

Figura 17 – EC#2: Capacidade (em litros) vs. confiabilidade perante risco constante (as curvas correspondem a cada valor de risco segundo a legenda mostrada).



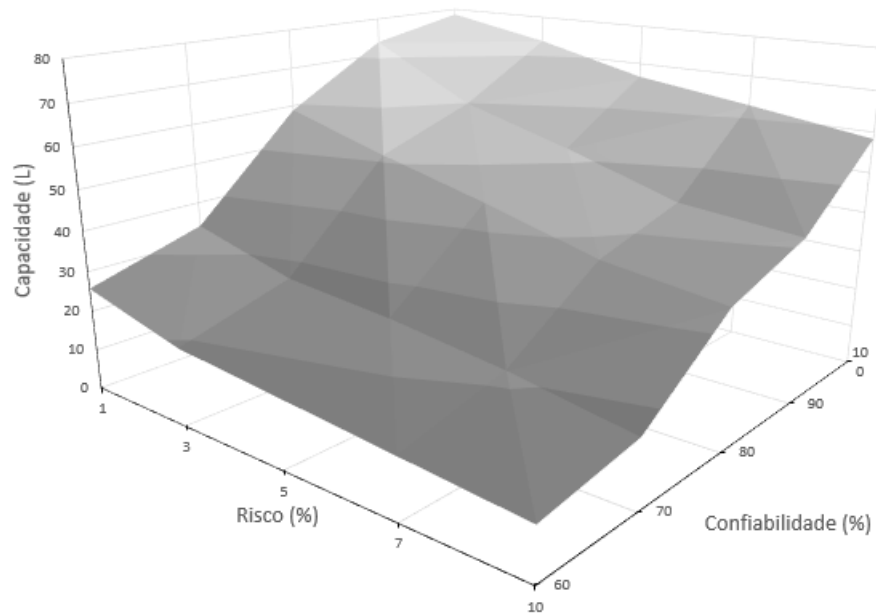
Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Figura 18 – EC#2: Capacidade (em litros) vs. risco perante confiabilidade constante (as curvas correspondem a cada valor de confiabilidade segundo a legenda mostrada).



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Figura 19 – EC#2: Capacidade vs. confiabilidade e risco.



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

4.3 Estudo de caso EC#3: dados americanos

A pesquisa de Mayer et al. (1999 apud Barreto, 2008) realizou a coleta de dados em 1188 residências americanas e encontrou os dados de consumo horário presente na Tabela 9, já transformados para a unidade litro. Foi verificado que ao dividir esse consumo diário por aparelho hidrossanitário pelo número 4 (pessoas por residência padrão) resulta em valores próximos aos apresentados na Tabela 4, ou seja, a produção *per capita* é semelhante ao encontrado na literatura brasileira e com isso não foi necessário realizar nenhuma transformação dos dados médios das residências americanas. Esses dados de geração de águas cinzas por aparelho hidrossanitário e de consumo de água para realizar a descarga do vaso sanitário estão presente na Tabela 18. O gráfico da Figura 20 apresenta esses dados de acordo com a variação horária das séries de entradas e de demandas do reservatório, onde a demanda é encontrada pela soma das parcelas do chuveiro e do lavatório.

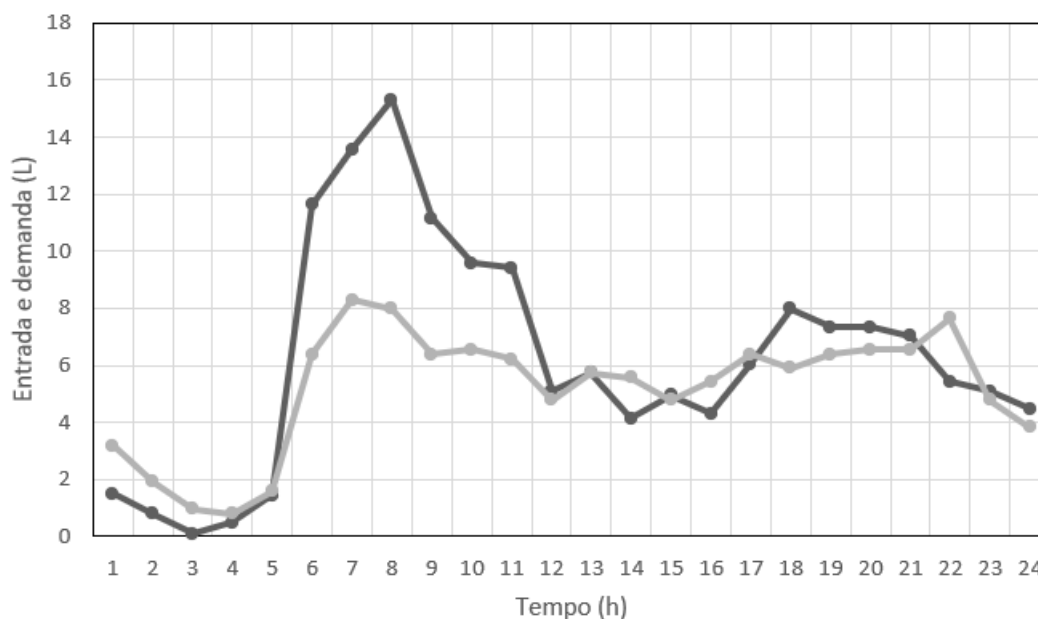
Para realizar o dimensionamento, como nos outros casos, foi utilizado o programa ARCOSOP. Utilizou-se as incertezas dos valores médios ao serem inseridos os desvios padrões por aparelho hidrossanitário presentes na Tabela 4. Como exemplo, para a entrada $R_T^{\min} = 60\%$ e $RISK = 10\%$ foram encontrados que a capacidade do reservatório dimensionado de forma determinística é de apenas 5,42 litros, valor bem abaixo dos 14,59 litros encontrados no dimensionamento de forma estocástica. Essa capacidade encontrada considerando as incertezas é confirmada a partir da etapa de validação que encontra o valor de 62,50% para a confiabilidade e 5,80% para o risco real. Conforme explicado no Capítulo 3, esse resultado é condizente pois após a operação dos 1000 cenários a $R_T^{\min} \leq R_T^{\text{risk}}$ e o $REALR \leq RISK$. Para este exemplo, o gráfico

Tabela 18 – EC#3: Dados de consumo horário utilizados no dimensionamento.

	Vaso sanitário (L)	Lavatório (L)	Chuveiro (L)
01 h	3,19	0,80	0,70
02 h	1,91	0,48	0,32
03 h	0,96	0,00	0,10
04 h	0,80	0,48	0,00
05 h	1,60	0,80	0,64
06 h	6,38	2,55	9,09
07 h	8,29	3,35	10,21
08 h	7,98	5,10	10,21
09 h	6,38	3,83	7,34
10 h	6,54	3,51	6,06
11 h	6,22	3,19	6,22
12 h	4,79	3,19	1,91
13 h	5,74	3,19	2,55
14 h	5,58	3,35	0,80
15 h	4,79	3,03	1,91
16 h	5,42	3,19	1,12
17 h	6,38	3,51	2,55
18 h	5,90	4,79	3,19
19 h	6,38	4,15	3,19
20 h	6,54	4,47	2,87
21 h	6,54	4,15	2,87
22 h	7,66	3,35	2,07
23 h	4,79	2,23	2,87
24 h	3,83	1,75	2,71

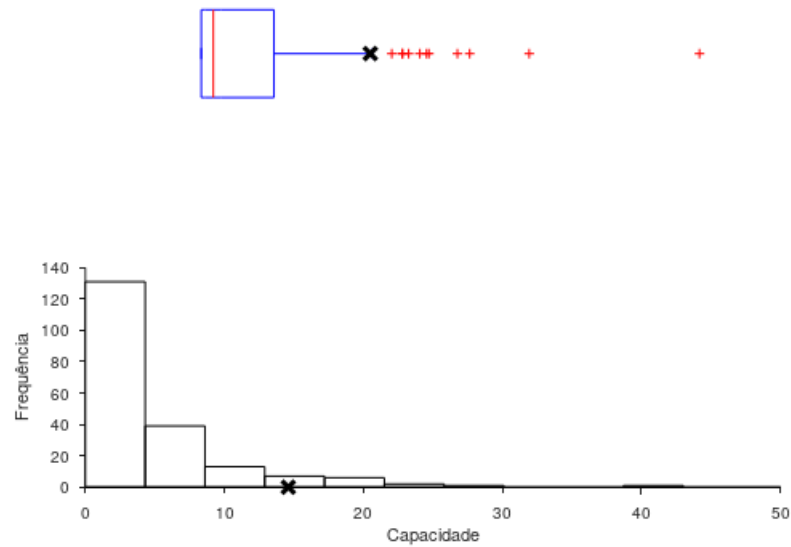
Fonte: Elaborada na pesquisa com base nos dados de Mayer et al. (1999 apud Barreto, 2008) .

Figura 20 – EC#3: Série de entradas (preto) e demandas (cinza) utilizadas para o dimensionamento.



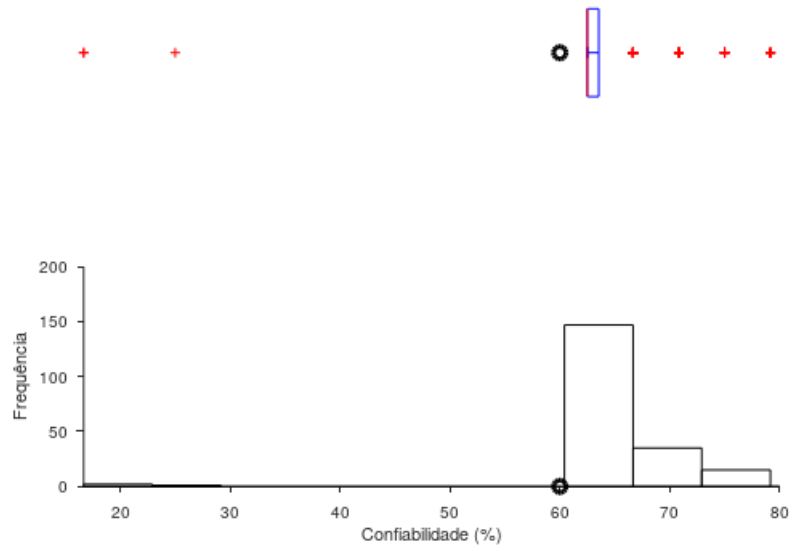
Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Figura 21 – EC#3: Distribuição de probabilidade e gráfico boxplot para a capacidade (em litros).



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Figura 22 – EC#3: Distribuição de probabilidade e gráfico boxplot para a confiabilidade.

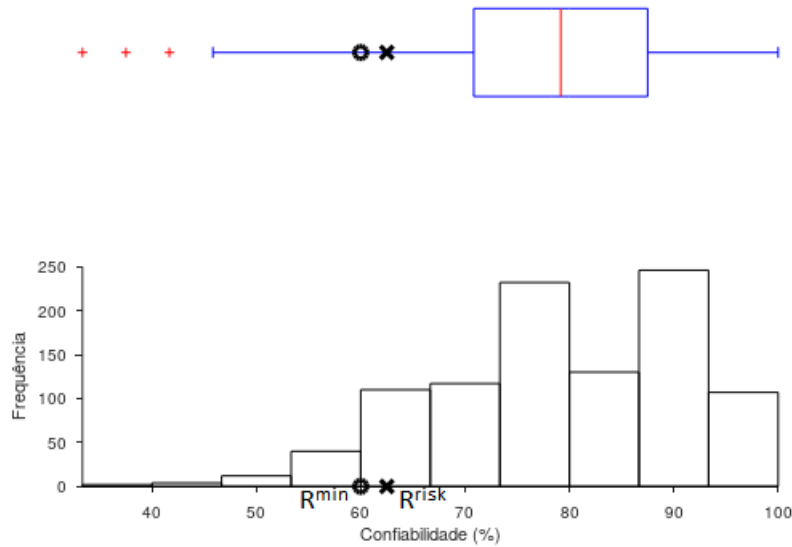


Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

da função de frequência da capacidade (FFC) está expresso na Figura 21. A Figura 22 demonstra a distribuição de frequência da confiabilidade na etapa de dimensionamento do programa. Para a etapa de validação foi construída a Figura 23, que expressa que $R_T^{\min} \leq R_T^{\text{risk}}$, ou seja, a confiabilidade após a operação da validação é igual ou superior a confiabilidade mínima predefinida

Realizando o mesmo procedimento para as 25 possibilidades de entrada expressas na Tabela 14, têm-se os resultados de capacidade presentes na Tabela 19. Com os resultados de todas as simulações realizadas, foi possível obter dois gráficos bidimensionais que relacionam

Figura 23 – EC#3: Distribuição de probabilidade da confiabilidade na etapa de validação.



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Tabela 19 – EC#3: Capacidades encontradas para as entradas propostas.

$R_T^{\min}(\%)$	RISK(%)				
	1	3	5	7	10
60	18,40	14,68	12,43	10,77	9,49
70	41,86	25,26	21,33	19,32	17,48
80	71,88	56,92	51,45	43,58	35,20
90	88,30	76,61	66,18	62,12	55,63
100	111,59	92,23	85,95	81,11	73,82

Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

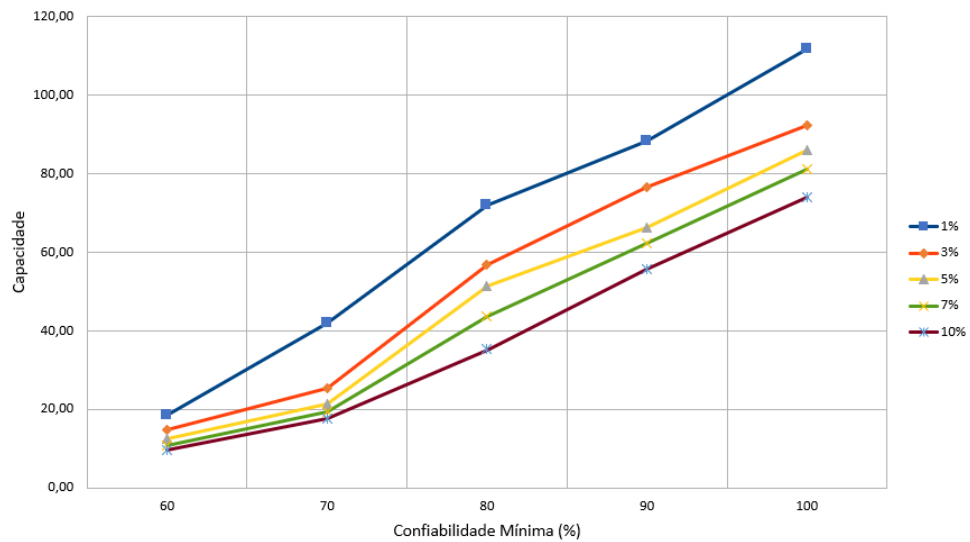
as variáveis envolvidas. O primeiro deles está presente na figura 24, onde o risco está constante e a capacidade e confiabilidade variam. Esse gráfico indica que a capacidade aumenta com o aumento da confiabilidade mínima assumida e, para a mesma confiabilidade, a capacidade aumenta com o declínio do risco assumido. O segundo gráfico na Figura 25 possui a confiabilidade mínima constante e o risco e a capacidade variam. Esse segundo gráfico demonstra que a capacidade diminui com o aumento do risco assumido e, para o mesmo risco, a capacidade aumenta com o aumento da confiabilidade mínima assumida.

O gráfico tridimensional presente na Figura 26 relaciona as variáveis capacidade, confiabilidade e risco de modo que infere-se que, assim como nos outros dados, a capacidade aumenta na medida em que a confiabilidade desejada é alta e o risco assumido é pequeno.

4.4 Discussão dos resultados

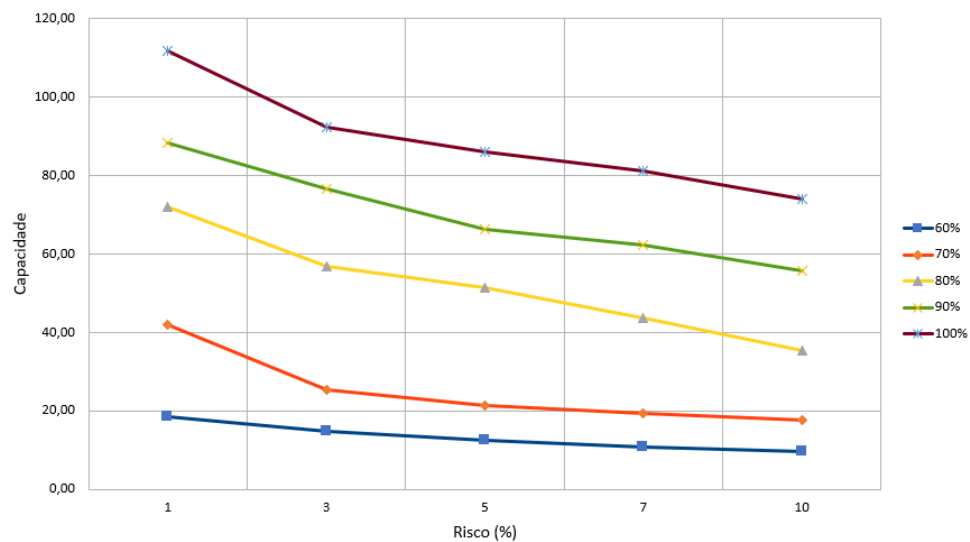
Em todas as bases de dados utilizadas (EC#1, EC#2 e EC#3), foi possível notar comportamento semelhante da capacidade com o aumento da confiabilidade e a diminuição do risco, visto que

Figura 24 – EC#3: Capacidade (em litros) vs. confiabilidade perante risco constante (as curvas correspondem a cada valor de risco segundo a legenda mostrada).



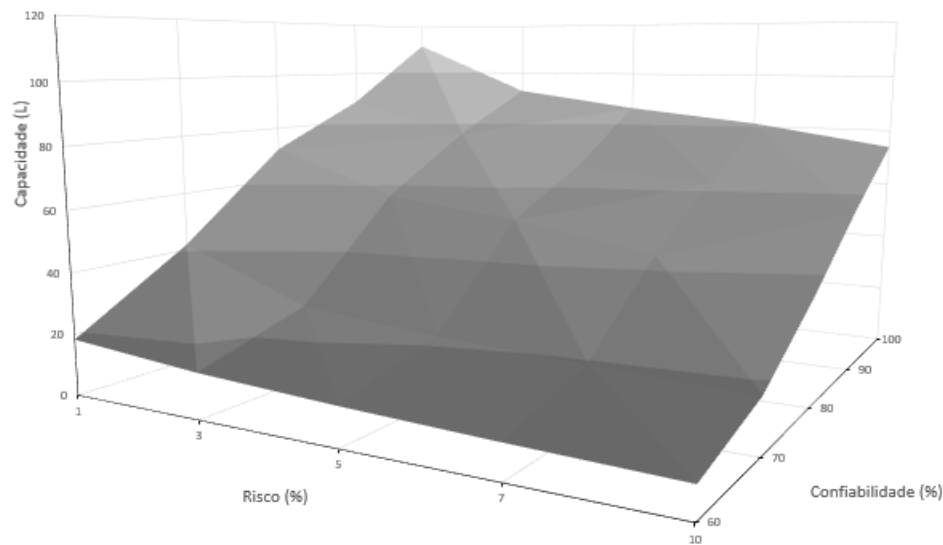
Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Figura 25 – EC#3: Capacidade (em litros) vs. risco perante confiabilidade constante (as curvas correspondem a cada valor de confiabilidade segundo a legenda mostrada).



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

Figura 26 – EC#3: Capacidade vs. confiabilidade e risco.



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

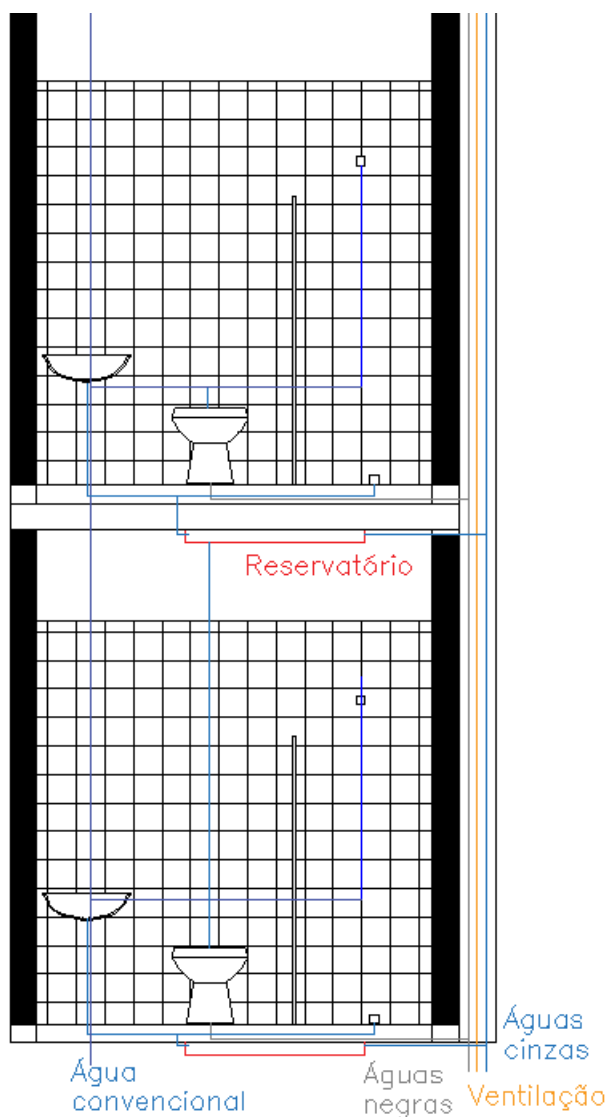
a capacidade aumenta à medida em que a confiabilidade tende a 100% e o risco aproxima-se de zero. Esses comportamentos estão ilustrados nas Figuras 12, 19 e 26.

A partir do dimensionamento estocástico do reservatório de águas cinzas utilizando os dados horários das três pesquisas, notou-se um valor máximo de 111,59 litros para o caso de $R_T^{\min} = 100\%$ e $RISK = 1\%$ nos dados da pesquisa americana. Sendo assim, para essa capacidade não ocorreriam falhas na regularização da demanda do vaso sanitário e o risco assumido seria mínimo. No caso do dimensionamento determinístico, ou seja, utilizando apenas um cenário o valor de capacidade encontrado foi de apenas 5,42 litros demonstrando que caso fosse utilizado essa capacidade, o reservatório seria subdimensionado.

Para realizar a utilização dessas águas cinzas em um reservatório a partir da geração dos aparelhos hidrossanitários do pavimento de cima para um pavimento abaixo é necessário separar as tubulações de esgoto secundário (lavatório e chuveiro) das tubulações de esgoto primário (vaso sanitário). Além disso, a configuração inclui o direcionamento das águas cinzas para o reservatório localizados no teto do banheiro do pavimento inferior e o eventual extravasamento seria direcionado para tubos de quedas específicos de águas cinzas localizado em shafts verticais. A Figura 27 traz a concepção do sistema para o último pavimento do prédio e o correspondente pavimento inferior.

No caso de um reservatório de 111,59 litros, seria suficiente um recipiente de $1,0 \text{ m}^2$ de base com uma altura de apenas 11,59 cm. Esse recipiente pode ser de plástico, permitindo a manutenção através da lavagem periódica. A sustentação seria desenvolvida em concreto armado próximo a laje sem grande variação arquitetônica. Segundo Agency (2011), seria possível reaproveitar a água cinza sem qualquer tratamento, desde que a água não seja armazenada por muito tempo antes de ser usada. Portanto, buscou-se realizar o dimensionamento considerando

Figura 27 – Concepção estrutural de utilização de águas cinzas.



Fonte: Elaborada durante a pesquisa.

a geração das águas cinzas diariamente e permitindo que em alguns momentos o reservatório fique seco, não armazenando a mesma água por um período tão elevado de tempo. Logo, através dessa concepção, as águas cinzas seriam utilizadas para operar a demanda das águas negras do pavimento de baixo sem a utilização de motobombas, utilizando apenas a gravidade para preencher a caixa acoplada do vaso sanitário. Em momentos de falta de água do reservatório, pode ser utilizada a água convencional para abastecer a demanda do pavimento de baixo.

Conclusão

Os problemas de falta de água potável no mundo estão levando a formas mais eficientes de utilização e gestão da água. Uma dessas novas formas é a reutilização de águas servidas para atividades que não necessitem de água de boa qualidade, como por exemplo na descarga de vasos sanitários.

Essa substituição promove a redução da demanda sobre os mananciais de água potável e provoca uma redução do esgoto gerado. A segregação dos efluentes domésticos proposta nessa pesquisa objetiva a reutilização dos resíduos de águas cinzas do banheiro para operar o vaso sanitário do pavimento inferior, ao invés dessas águas serem direcionadas para a coleta de esgoto convencional e consequentemente misturadas com as águas negras do mesmo pavimento. Essa concepção vai de acordo com as práticas de saneamento ecológico na medida em que promove a redução do uso de água potável pela substituição por uma água já utilizada e que já seria destinada para a rede de esgoto.

Esta pesquisa propôs o dimensionamento de um reservatório de águas cinzas para suprir a demanda do vaso sanitário. Porém, diferentemente de outros trabalhos, levou em consideração a vazão horária dos aparelhos hidrossanitários (lavatório e chuveiro) que contribuem para o reservatório. Para tal, foram utilizados dados de três investigações que obtiveram as informações de geração de águas cinzas e consumo do vaso sanitário de forma horária. Com o objetivo de empregar o dimensionamento estocástico, foram utilizados os desvios padrões diários por aparelho sanitário e, após modificação, obtidos esses desvios de forma horária.

Utilizando o programa ARCOSOP, foi conduzido o dimensionamento da capacidade do reservatório considerando as incertezas da geração e da demanda. Buscou-se a validação do procedimento através do cálculo da confiabilidade perante determinado risco em uma análise da distribuição de frequências por meio de cenários de afluições (abordagem de Monte Carlo). Em todos os testes, constatou-se que a confiabilidade perante o risco é maior que a confiabilidade inicial proposta, de modo que o risco real é inferior ao risco fixado inicialmente e o procedimento de cálculo da capacidade era válido.

Foram produzidos gráficos bidimensionais que relacionam cada uma das duas variáveis (confiabilidade e risco) com a capacidade e a partir deles foi mostrado como essa variação ocorre. No caso do gráfico de capacidade versus confiabilidade, encontrou-se que a capacidade é proporcional à confiabilidade. Já no caso da capacidade versus risco, encontrou-se que a capacidade é inversamente proporcional ao risco, ou seja, ela aumenta à medida que o risco diminui. Também foram produzidos gráficos tridimensionais correlacionando as três variáveis (confiabilidade, risco e capacidade) e a partir deles mostrado como essa variação ocorre. Para os três conjuntos de dados o comportamento é o mesmo, i.e., à medida que a confiabilidade aumenta e o risco diminui a capacidade aumenta.

No caso da confiabilidade máxima e do menor risco nos testes, foram encontrados os

valores aproximados de 64, 79 e 112 litros para as pesquisas de Abbood, Mustafa e Ali (2013), Barreto (2008) e Mayer et al. (1999 apud Barreto, 2008), respectivamente. Com esses valores, pode-se pensar em um recipiente de base $1,0 \text{ m}^2$ e com altura a depender do volume pretendido capaz de operar o reservatório perante a demanda do vaso sanitário. A concepção do sistema foi trazida nessa pesquisa objetivando atender a necessidade do vaso sanitário do pavimento inferior sem a utilização de motobombas e sem gastos com energia já que o sistema funcionaria por gravidade.

Referências

- ABBOOD, D. W.; MUSTAFA, A. S.; ALI, S. A. K. Social investigation of greywater reuse in baghdad. *Civil and Environmental Research*, v. 3, n. 12, 2013.
- ABNT. *NBR 5626: Instalações prediais de Água fria*. Rio de Janeiro, 2011.
- AGENCY, E. *Greywater for Domestic Users: An Information Guide*. Bristol: Environment Agency Bristol, 2011.
- ANA. *Conservação e reúso da água em edificações*. [S.l.]: ANA - Agência Nacional das Águas, 2005.
- ANDERSON, J. Prospects for international guidelines for water recycling. *Water*, v. 21, p. 16–21, 2001.
- ARAÚJO, G. M. *Recursos Hídricos Mundiais*. Fortaleza: DNOCS, 1988.
- BARRETO, D. Perfil do consumo residencial e usos finais da água. *Ambiente Construído*, v. 8, n. 2, p. 23–40, 2008.
- CELESTE, A. B. Reservoir design optimization incorporating performance indices. *Water Resources Management*, v. 29, n. 12, p. 4305–4318, 2015.
- CELESTE, A. B.; FEITOSA, D. T.; CORREIA, E. M. Análise de métodos para geração de vazões sintéticas no agreste sergipano. In: ABRH. *Anais do XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. João Pessoa, 2012.
- ESREY, S. et al. *Ecological Sanitation*. Estocolmo: Swedish International Development Cooperation Agency, 1998.
- FERREIRA, D. F. *Aproveitamento de águas pluviais e reuso de águas cinzas para fins não potáveis em um condomínio residencial localizado em Florianópolis–SC*. Santa Catarina, 2005. 152 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- FIORI, S.; FERNANDES, V. M. C.; PIZZO, H. Avaliação qualitativa e quantitativa do reúso de águas cinzas em edificações. *Ambiente Construído*, v. 6, n. 1, p. 19–30, 2006.
- FUNASA. *Manual de Saneamento*. Brasília: Fundação Nacional de Saúde (Funasa), 2006.
- HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 18, n. 1, p. 14–20, 1982.
- HELLER L.; PÁDUA, V. *Abastecimento de água para consumo humano*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. 859 p.
- JEFFERSON, B. et al. Technologies for domestic wastewater recycling. *Urban Water*, v. 1, n. 4, p. 285–292, 2000.
- KLEMEŠ, V. Storage mass-curve analysis in a systems-analytic perspective. *Water Resources Research*, v. 15, n. 2, p. 359–370, 1979.

- LIMA, A. C. C. *Um modelo de otimização inteira mista para dimensionamento de reservatórios incorporando índices de desempenho: Abordagens determinística e estocástica*. Qualificação (Mestrado) – Universidade Federal de Sergipe, 2021. Em andamento (não publicado).
- MAYER, P. W. et al. *Residential end uses of water*. [S.l.], 1999. Relatório Técnico. AWWA Research Foundation and American Water Works Association.
- MENEZES, C. d. S. de; MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; LOUREIRO, P. Quantificação de águas residuárias para reúso na perspectiva do saneamento ecológico. In: ABRH. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Maceió, 2011.
- NAGY, I. V.; ASANTE-DUAH, K.; ZSUFFA, I. *Hydrological dimensioning and operation of reservoirs: practical design concepts and principles*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. v. 39.
- OLIVEIRA, S. M. *Aproveitamento da água da chuva e reúso de água em residências unifamiliares: estudo de caso em Palhoça-SC*. Santa Cararina, 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- PANSONATO, N. et al. Caracterização de água cinza em uma residência de baixa renda em campo grande, ms, brasil. In: *Conferência Internacional em Saneamento Sustentável: Segurança Alimentar e Hídrica para a América Latina*. Fortaleza: [s.n.], 2007.
- PERTEL, M. *Caracterização do uso da água e da energia associada à água em uma edificação residencial convencional e uma dotada de sistema de reúso de águas cinza*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.
- RAO, S. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. Hoboken: Wiley, 2009.
- RIPPL, W. The capacity of storage-reservoirs for water-supply. *Minutes Proc. Inst. Civil Eng.*, v. 71, p. 270–278, 1883.
- SANT’ANA, D. R.; BOEGER, L.; MONTEIRO, L. Aproveitamento de águas pluviais e o reúso de águas cinzas em edifícios residenciais de Brasília – parte 1: reduções no consumo de água. *Paranoá*, v. 10, p. 77–84, 2013.
- SIMONOVIC, S. P. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 118, n. 3, p. 262–280, 1992.