

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ALOCAÇÃO EFICIENTE DE FONTES DE ÁGUA EM UMA RESIDÊNCIA

THIAGO BARBOSA DE JESUS

FEIRA DE SANTANA, BA
SETEMBRO/2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ALOCAÇÃO EFICIENTE DE FONTES DE ÁGUA EM UMA RESIDÊNCIA

THIAGO BARBOSA DE JESUS

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental

Área de concentração: Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Henrique Borges Cohim Silva

FEIRA DE SANTANA, BA
SETEMBRO/2018

Ficha Catalográfica – Biblioteca Central Julieta Carteado

J56a Jesus, Thiago Barbosa de
Alocação eficiente de fontes de água em uma residência./ Thiago
Barbosa de Jesus. – 2018.
89f.: il.

Orientador: Eduardo Henrique Borges Cohim Silva

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

1.Fontes de abastecimento – Água. 2.Sistema descentralizados.
3.Intensidade energética – Feira de Santana. 4.Semiárido brasileiro.
I.Silva, Eduardo Henrique Borges Cohim, orient. II.Universidade
Estadual de Feira de Santana. III.Título.

CDU: 6281

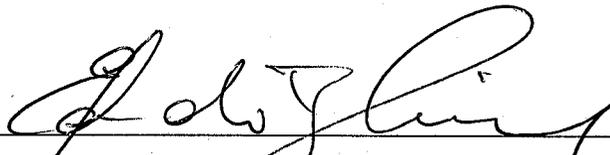
Maria de Fátima de Jesus Moreira – Bibliotecária – CRB5/1120

ALOCAÇÃO EFICIENTE DE FONTES DE ÁGUA EM UMA RESIDÊNCIA

Thiago Barbosa de Jesus

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Aprovada por:



Prof. Eduardo Henrique Borges Cohim Silva, D Sc.

(Universidade Estadual de Feira de Santana)



Profa. Patrícia dos Santos Nascimento, D Sc.

(Universidade Estadual de Feira de Santana)



Prof. Ricardo de Araujo Kalid, D Sc.

(Universidade Federal do Sul da Bahia)

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

SETEMBRO DE 2018

DEDICATÓRIA

À minha família

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Eduardo Cohim pela amizade, que sempre acreditou no meu potencial e me enriqueceu com seus ensinamentos. A Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECEA) por me oferecer a oportunidade de realização do curso. Aos professores Patrícia Nascimento, Silvio Orrico, Tereza Simone, Roque Angélico, Anderson Gádea e Mônica Leite. A Mariana Cordeiro e Katia, secretárias do PPGECEA. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

Meu agradecimento especial é dedicado os meus pais, Osmar Mascarenhas e Alba Cristina, pela educação, formação pessoal e apoio em toda minha vida. A minha irmã, Thaiane Barbosa, que mesmo na distância sempre se manteve presente em todos os momentos. A Heyse Oliveira que me estimulou durante o tempo dedicado aos estudos. Aos amigos Poliana Brandão, Chayan Rios, Vanessa Nascimento, Elisabeth Barreto, Alice Kiperstok, Mathurin Francois, Denilton Salomão, Samuel Sipert, Renato Campos, Vinicius Borges e Hamilton. E a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para minha formação e que torceram por mim e porventura não foram citados.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ALOCAÇÃO EFICIENTE DE FONTES DE ÁGUA EM UMA RESIDÊNCIA

Thiago Barbosa de Jesus

Setembro/2018

Orientador: Eduardo Henrique Borges Cohim Silva, D Sc:

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

Este estudo está estruturado em quatro artigos-capítulos dedicados a identificação e minimização da Intensidade Energética (IE) no abastecimento de água. No primeiro artigo objetivou-se encontrar a IE de Sistemas de Aproveitamento de Água de Chuva (SAAC). Os resultados demonstraram a existência de um ótimo energético entre os volumes de reservatórios de $1,0 \cdot 10^3$ L a $2,5 \cdot 10^3$ L, para as áreas de captação testadas com demanda igual de $4,8 \cdot 10^2$ L·(residência·dia)⁻¹. O desempenho energético calculado ficou de $0,51$ kWh·m⁻³ a $0,90$ kWh·m⁻³. Para o valor médio de área de captação de 80 m² a IE mínima foi de $0,72$ kWh·m⁻³ com reservatório de $1,75 \cdot 10^3$ L. O segundo artigo explorou diferentes materiais para os diversos componentes do SAAC, incluindo a calha, reservatório e fonte de energia. Destes o mais relevante foi o reservatório, seguido da calha e fonte de energia. A configuração menos intensiva foi o uso do reservatório de polietileno, a calha de alumínio e energia fotovoltaica, neste cenário a IE calculada foi de $0,66$ kWh·m⁻³. Os resultados obtidos neste artigo mostraram a importância da escolha dos componentes dos SAAC, que afetam diretamente a IE final. No terceiro artigo foi avaliado o aproveitamento da água subterrânea com profundidades variando de 5 m a 25 m, sendo encontradas IE de $1,74$ kWh·m⁻³ a $2,97$ kWh·m⁻³. O revestimento do poço e a bomba foram os componentes mais intensivos, com participação superior a 70% em todas as profundidades. Nos três artigos elaborados a IE encontrada foi inferior à do sistema público de abastecimento e a fase de implantação foi a que mais contribuiu para a IE final. Este resultado mostra a importância na escolha dos componentes dos sistemas descentralizados de abastecimento, que estes afetam diretamente a IE. O quarto artigo buscou encontrar o melhor arranjo de fornecimento de água que propicie o menor encargo energético associado a água de abastecimento de uma residência. Foram utilizados os valores encontrados nos artigos elaborados no âmbito desta dissertação, complementados com dados de IE da água cinza encontrada em literatura. O *mix* de água do sistema público, água de chuva, subterrânea e cinza resultaria no encargo energético de $2,44$ kWh·m⁻³, para o abastecimento de uma residência com quatro pessoas no município de Feira de Santana/BA. Esse valor representaria uma redução de 31% da IE em relação ao sistema público e de 72% do consumo da água do sistema público.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Fontes de abastecimento; Sistema descentralizados; Intensidade energética.

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EFFICIENT ALLOCATION OF WATER SOURCES IN A RESIDENCE

Thiago Barbosa de Jesus

September/2018

Advisor: Eduardo Henrique Borges Cohim Silva, D Sc:

Department: Civil and Environment Engineering

This study is structured in four chapters-articles dedicated to identify and minimize the Energy Intensity (EI) of water supply. In the first article we aimed to find the EI of Rainwater Harvesting Systems (RWHS). The results showed the existence an optimal point between the reservoir volumes from $1.0 \cdot 10^3$ L to $2.5 \cdot 10^3$ L, adopting the catchment areas tested with equal demand of $4.8 \cdot 10^2$ L·(residence·day)⁻¹. The calculated energy performance was $0.51 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ at $0.90 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$. For the mean value of catchment area of 80 m^2 the minimum EI was $0.72 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ with a reservoir of $1.75 \cdot 10^3$ L. The second article explored different materials for the various RWHS components, including the gutter, reservoir and energy source. Between these components, the most relevant was the reservoir, followed by gutter and energy source. The least intensive configuration was the use of the polyethylene reservoir, the aluminum gutter and photovoltaic energy, for this scenario the calculated EI was $0.66 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$. The results obtained in this article showed the importance of choosing materials for RWHS, which directly affect the final EI. In the third article we evaluated the use of groundwater with depths ranging from 5 m to 25 m, with EI from $1.74 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ to $2.97 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$. The well casing and the pump were the most intensive components, with more than 70% participation at all depths. In the three articles elaborated the EI found was lower than the public supply system and the construction phase was the one that most contributed to the final EI. This result shows the importance for the choosing components of decentralized supply systems, that these directly affect EI. The fourth article sought to find the best water supply arrangement that would provide the least EI associated with the water supply of a residence. The values found in the articles elaborated within this dissertation were used, complemented with EI data of gray water found in the literature. The public water, rainwater, underground and gray water mix would result in an EI of $2.44 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ for the supply of a residence with four people in the municipality of Feira de Santana/BA. This figura would represent a reduction of 31% of EI in relation to the public system and 72% of the water consumption of the public system.

Keywords: Life Cycle Assessment; sources of supply; decentralized system; energy intensity.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | CONTEXTUALIZAÇÃO | 1 |
| 1.1 | INTRODUÇÃO GERAL | 1 |
| 1.2 | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 3 |
| | REFERÊNCIAS | 5 |
| | APÊNDICE A – QUADRO DE PUBLICAÇÕES | 6 |
| 2 | AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA PARA RESIDÊNCIAS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO | 7 |
| 2.1 | INTRODUÇÃO | 8 |
| 2.2 | MATERIAIS E MÉTODOS | 10 |
| 2.2.1 | Estudo de caso | 10 |
| 2.2.2 | Coleta de dados | 10 |
| 2.2.3 | Sistemas de captação de água de chuva | 11 |
| 2.2.4 | Energia operacional | 12 |
| 2.2.5 | Análise do Ciclo de Vida | 12 |
| 2.2.6 | Definição dos objetivos e escopo | 12 |
| 2.2.7 | Inventário | 13 |
| 2.2.8 | Avaliação do impacto | 13 |
| 2.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 14 |
| 2.3.1 | Potencial de economia de água potável | 14 |
| 2.3.2 | Demanda de Energia Acumulada | 15 |
| 2.3.3 | Considerações finais para Feira de Santana | 20 |
| 2.4 | CONCLUSÃO | 20 |
| | REFERÊNCIAS | 22 |
| 3 | PARTICIPAÇÃO DOS COMPONENTES NA INTENSIDADE ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA | 25 |
| 3.1 | INTRODUÇÃO | 26 |
| 3.2 | MATERIAIS E MÉTODOS | 27 |
| 3.2.1 | Escopo | 28 |
| 3.2.2 | Unidade funcional | 29 |
| 3.2.3 | Fronteiras do sistema | 30 |
| 3.2.4 | Análise do inventário | 30 |
| 3.3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 31 |
| 3.4 | CONCLUSÃO | 36 |
| | REFERÊNCIAS | 38 |
| 4 | AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE POÇOS RASOS PARA ABASTECIMENTO DOMÉSTICO | 40 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO | 41 |
| 4.2 | MATERIAIS E MÉTODOS | 42 |
| 4.2.1 | Local de estudo | 42 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2.2 | Coleta de dados | 43 |
| 4.2.3 | Características do sistema de aproveitamento de água subterrânea | 44 |
| 4.2.4 | Energia de operação | 46 |
| 4.2.5 | Avaliação do Ciclo de Vida | 46 |
| 4.2.5.1 | Definição dos objetivos e escopo | 46 |
| 4.2.5.2 | Análise de inventário | 47 |
| 4.2.5.3 | Avaliação de impactos | 47 |
| 4.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 47 |
| 4.3.1 | Estimativa da produção de água | 47 |
| 4.3.2 | Energia necessária na fase de uso | 48 |
| 4.3.3 | Demanda de Energia Acumulada | 49 |
| 4.4 | CONCLUSÃO | 52 |
| | REFERÊNCIAS | 54 |
| 5 | MINIMIZAÇÃO DA INTENSIDADE ENERGÉTICA NO ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE UMA RESIDÊNCIA NO MUNICÍPIO DE FEIRA DE SANTANA/BA | 57 |
| 5.1 | INTRODUÇÃO | 58 |
| 5.2 | MATERIAIS E MÉTODOS | 60 |
| 5.2.1 | Local de estudo | 60 |
| 5.3 | FONTES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA | 61 |
| 5.3.1 | Sistema de abastecimento público | 62 |
| 5.3.2 | Aproveitamento de água pluvial | 62 |
| 5.3.3 | Aproveitamento da água subterrânea | 62 |
| 5.3.4 | Reúso de água cinza | 63 |
| 5.4 | DIAGRAMA DE FONTES E USOS | 64 |
| 5.5 | MINIMIZAÇÃO ENERGÉTICA | 65 |
| 5.6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 66 |
| 5.7 | CONCLUSÃO | 70 |
| | REFERÊNCIAS | 71 |
| 6 | CONCLUSÃO GERAL | 74 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Localização da cidade de Feira de Santana..... | 10 |
| Figura 2.2 – Fronteiras do sistema de captação de água de chuva..... | 13 |
| Figura 2.3 - Potencial de economia de água com o uso do aproveitamento de água da chuva de acordo com os diferentes volumes de reservatório e área de captação de 50 m ² (azul escuro); 80 m ² (laranja); 100 m ² (cinza); 120 m ² (amarelo); 150m ² (azul claro); 250 m ² (verde). | 14 |
| Figura 2.4 – Intensidade Energética para a configuração de SAAC com área de captação de 250 m ² | 16 |
| Figura 2.5 – Contribuição de materiais e energia da fase de uso na intensidade energética do SAAC com as seguintes configurações. | 17 |
| Figura 3.1 – Esquema de Sistema de Aproveitamento de Água de Chuva | 29 |
| Figura 3.2 – Intensidade energética e emissões de CO ₂ eq para calhas..... | 32 |
| Figura 3.3 – Intensidade energética e emissões de CO ₂ eq para os reservatórios. | 32 |
| Figura 3. 4 – Intensidade energética e emissões de CO ₂ eq para as fontes energéticas. 33 | |
| Figura 3.5 – Participação da intensidade energética nas fases de construção, operação e disposição de resíduos dos sistemas. | 34 |
| Figura 3.6 – Intensidade energética dos componentes dos sistemas avaliados. | 35 |
| Figura 4.1 - Localização do município de Feira de Santana/BA. | 43 |
| Figura 4.2 – Esquema de captação da água subterrânea..... | 45 |
| Figura 4.3 –Participação das etapas dos sistemas na intensidade energética. | 50 |
| Figura 4.4 - Contribuição de cada componente do sistema na intensidade energética da implantação dos sistemas. O item (a), (b) e (c) corresponde as profundidades de 5 m, 15 m e 25 m, respectivamente. O item outros corresponde as tubulações e conexões, com participação inferior a 1% em quase todos os casos..... | 52 |
| Figura 5.1 – Valores médios de contribuição dos aparelhos hidráulicos no uso da água para a amostra de residências | 61 |
| Figura 5.2 –Diagrama de fontes e usos. | 65 |
| Figura 5.3 - Participação das fontes de abastecimento nos usos da residência. | 68 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Intensidade Energética dos sistemas..... | 15 |
| Tabela 2.2 - A relação entre produção e capacidade de armazenamento dos reservatórios, para um sistema com uma área de captação de 250 m ² | 19 |
| Tabela 3.1 – Dados de entrada do inventário | 31 |
| Tabela 4.1 – Desempenho da bomba submersa vibratória. | 45 |
| Tabela 4.2 - Inventário dos sistemas avaliados de aproveitamento da água subterrânea. | 47 |
| Tabela 4.3 - Vazão, tempo de funcionamento, uso de energia e rendimento dos sistemas. | 48 |
| Tabela 4.4 - Intensidade energética dos sistemas dos sistemas de aproveitamento de água subterrânea avaliados..... | 49 |
| Tabela 5.1 - Consumo previsto por aparelho hidráulico na residência. | 61 |
| Tabela 5.2 –Contribuição das fontes de abastecimento para os usos da residência. | 67 |
| Tabela 5.3 – Volumes ótimos utilizados de cada fonte em uma residência. | 69 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

AFM - Análise dos Fluxo dos Materiais

ANA - Agência Nacional de Águas

BA - Bahia

CED - Demanda Acumulada de Energia

CO₂ – Dióxido de carbono

CO_{2 eq} – Dióxido de carbono equivalente

EMBASA - Empresa Baiana de Águas e Saneamento S/A

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EUA - Estados Unidos da América

GLO - Global

GWP - Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IE - Intensidade Energética

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

ISO - International Organizatio for Standardization (Organização Internacional de Normalização)

ISO - International Organization for Standardization

kWh – Kilowatt-hora

L – Litro

L - Litros

L·(hab·dia) – Litro por habitante dia

m³ – Metro cúbico

MJ – Mega joule

MtCO_{2 eq} – Milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente

NBR – Norma Brasileira

ONU - Organização das Nações Unidas

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PVC - Policloreto de Vinil

RAC - Reator Anaeróbio Compartimentado
RAFA - Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
ROW - Rest of the World (Resto do Mundo)
SAAC - Sistemas de Aproveitamento de Água de Chuva
SCAC - Sistema de Captação de Água de Chuva
SIAA - Sistema Integrado de Abastecimento de Água
SSA - Sistema de Abastecimento de Água
tCeq – Toneladas de Carbono equivalente
UNDESA - United Nations Department of Economic and Social Affairs (Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais dos Estados Unidos)

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

Diferentemente do que acontece com os ecossistemas naturais, as cidades possuem metabolismo linear nos fluxos de energia e materiais (LI *et al.*, 2016), no qual, para suprir e manter as diversas atividades consuntivas é necessário constantemente o fornecimento de insumos.

As áreas urbanas, além de produzir impactos locais provocam grande impacto no meio ambiente fora de suas fronteiras, justamente pela forte pressão que colocam na extração dos recursos e disposição de resíduos (ZHANG, 2013), o que contribui para a degradação ambiental e o esgotamento de recursos naturais.

Os primeiros estudos de limites ambientais para as atividades humanas enfatizaram limites ao uso de recursos ambientais, que mostram que estas fronteiras no uso de materiais já foram ultrapassadas e que restrições as ações que promovam problemas como poluição do ar e da água, acidificação dos oceanos, geração de gases efeito estufa e depleção da camada de ozônio devem ser mais rigorosas (GOODLAND *et al.*, 1996; STEFFEN *et al.*, 2015).

Uma das formas de avaliar os impactos resultantes dos fluxos de massas, é a aplicação do conceito de Metabolismo Urbano, no qual consiste na verificação das entradas, armazenamentos e saídas do sistema de massas e energia (WOLMAN, 1965; KENNEDY *et al.*, 2007). Ferramentas ambientais foram desenvolvidas a partir deste conceito, uma delas é a de Análise dos Fluxos de Materiais (AFM) (KENNEDY *et al.*, 2011), amplamente utilizada e considerada como uma das principais ferramentas de avaliação de fluxos e os estoques de materiais dentro de um sistema.

Kennedy *et al.* (2007) aplicaram a metodologia de AFM em algumas regiões metropolitanas e mostraram um aumento do consumo de novos recursos per capita em relação a todos os fluxos, o que é reconhecido como um problema que ameaça o desenvolvimento urbano sustentável, definido por Goodland *et al.* (1996) como a capacidade de evoluir sem aumentar o consumo de novos materiais e energia, além das capacidades regenerativas e de absorção naturais.

Dentre os fluxos de massa no meio urbano, a água é o insumo mais consumido, sendo utilizada nas diversas atividades (KENNEDY *et al.*, 2007). As mudanças climáticas, o crescimento populacional e a concorrência sobre os recursos hídricos disponíveis ameaçam a viabilidade das fontes de água convencionais em todo o mundo (KAVVADA *et al.*, 2016). A demanda por este recurso deve crescer, não só para satisfazer o consumo humano de água, mas também, para suprir o uso na produção de energia, alimentos e produtos.

Além disso, a má gestão dos recursos hídricos, as alterações nos padrões de consumo de água e a seca trouxeram a escassez de água potável em várias áreas do mundo. A água não poluída está se tornando um recurso escasso e o custo do abastecimento e tratamento de água está aumentando constantemente (CRETIAZ *et al.*, 1999).

Aproximadamente um quarto da população das grandes cidades tem suprimentos de água que estão estressados e nessas regiões estão concentrados cerca de 22% da economia mundial. Essa quantidade de atividade econômica em grandes cidades com fontes inseguras de água enfatiza a importância do manejo sustentável dessas fontes não apenas para a viabilidade de cidades, mas também da economia global (MCDONALD *et al.*, 2014).

Tradicionalmente os sistemas de abastecimento de água se desenvolveram de forma centralizada, tratando a água a nível de potabilidade para ser posteriormente distribuído a população (HARDY *et al.*, 2015). Contudo, devido ao aumento do consumo de água e deterioração da água próxima aos centros urbanos são demandados grande quantidade de energia para disponibilização de água aos usuários.

A água e energia estão interconectadas, a água é demandada para produção de energia e a energia é utilizada para captar, tratar, distribuir, e coletar e tratar a água poluída. Esse nexos e a sustentabilidade ambiental estão estreitamente relacionados e são vitais não só para economia, mas para preservação do meio ambiente (OLSSON, 2011). A relação dos fluxos de água e energia estão intrinsecamente interligados, assim como as emissões de gases causadores do efeito estufa resultante da produção energética. A atual aplicação da gestão da oferta de água aos centros urbanos, vem trazendo soluções com alto encargo energético. É importante para preservação ambiental, a adoção de medidas que priorizem a conservação do recurso hídrico e que possibilite o menor encargo energético para sua disponibilização para consumo.

Uma das alternativas para minimização da Intensidade Energética (IE) no fornecimento de água é a adoção de sistemas descentralizados, a exemplo do uso da água subterrânea, água de chuva e reúso de água cinza, que maximizam a oferta hídrica de fontes próximas ao ponto de consumo, sem pressão adicional nas águas naturais. Entretanto, estes sistemas também são consumidores de energia, portanto e, os impactos resultantes dessas ações devem ser avaliados.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por seis capítulos incluindo este introdutório, e considerações gerais que sintetizam os resultados encontrados. O conteúdo dos demais capítulos são compostos por artigos, com suas respectivas introduções, objetivos, materiais e métodos, resultados, discussões e conclusões.

Nos Capítulos 2, 3 e 4 são apresentados estudos que avaliam a intensidade energética em sistemas descentralizados de abastecimento, que utilizam água de chuva e subterrânea. O Capítulo 5 apresenta um modelo de minimização energética de um sistema residencial de abastecimento de água, baseado no uso de fontes alternativas e complementado com a água do sistema público.

No Capítulo 2, intitulado *Life Cycle Assessment of Rainwater Harvesting Systems for Brazilian Semi-arid Households* (Avaliação do Ciclo de Vida para Sistemas de Captação de Água de Chuva para Região Semiárida do Brasileira) é aplicada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para encontrar a IE em sistemas de aproveitamento de água de chuva com diferentes áreas de captação e volumes de reservatório.

Após elaboração do artigo (Capítulo 2), foi identificado maior participação da fase de implantação que a de uso, na composição da IE do sistema, o que motivou a construção de outro artigo contido no Capítulo 3, nomeado *Participation of Components in the Energy Intensity of Rainwater Harvesting Systems* (Participação dos componentes na intensidade energética de sistemas de aproveitamento de água de chuva), que avalia diferentes materiais nos sistemas de aproveitamento de água de chuva.

A EI em sistemas de aproveitamento de água subterrânea, foi obtida no artigo do Capítulo 4 (Avaliação Energética de Poços Rasos para Abastecimento Doméstico), em que também utilizou a metodologia de ACV para sua determinação.

A Minimização da Intensidade Energética no Abastecimento de Água de uma Residência, foi discutida no Capítulo 5, que utiliza valores de intensidades energéticas e produção de água encontradas em bibliografia e nos valores obtidos nos trabalhos apresentados.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões da pesquisa proposta e sugestões para trabalhos futuros que abordem o tema em questão.

REFERÊNCIAS

- CRETIAZ, P *et al.* Life cycle assessment of drinking water and rain water for toilets flushing. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, v. 48, n. 3, p. 73–83, 1999.
- GOODLAND, Robert *et al.* Environmental Sustainability: Universal and Non-Negotiable ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY : v. 6, n. 4, p. 1002–1017, 1996.
- HARDY, Devon *et al.* *Alternative Water Resources: A Review of Concepts, Solutions and Experiences*, 2015.
- KAVVADA, Olga *et al.* Assessing Location and Scale of Urban Non-Potable Water Reuse Systems for Life-Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions Assessing Location and Scale of Urban Non-Potable Water Reuse Systems for Life-Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas. 2016.
- KENNEDY, C; PINCETL, S; BUNJE, P. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution*, v. 159, n. 8–9, p. 1965–1973, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.022>>.
- KENNEDY, Christopher; CUDDIHY, John; ENGEL-YAN, Joshua. The Changing Metabolism of Cities. *Journal of Industrial Ecology*, v. 11, n. 2, 2007.
- LI, Ying *et al.* Resources , Conservation and Recycling Evaluating urban sustainability potential based on material flow analysis of inputs and outputs : A case study in Jinchang City , China. “*Resources, Conservation & Recycling*”, v. 110, p. 87–98, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.023>>.
- MCDONALD, Robert I. *et al.* Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. *Global Environmental Change*, v. 27, n. 1, p. 96–105, 2014.
- OLSSON, Gustaf; OLSSON, Gustaf. Water and Energy Nexus. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, n. January 2011, p. 1–19, 2011.
- STEFFEN, Will *et al.* Planetary boundaries : Guiding changing planet. *Science*, v. 1259855, p. 12, 2015.
- WOLMAN, A. The Metabolism of cities. *Scientific American* 213 (3): p. 179-190, 1965.
- ZHANG, Yan. Urban metabolism : A review of research methodologies. *Environmental Pollution*, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.052>>.

APÊNDICE A – QUADRO DE PUBLICAÇÕES

| ARTIGO | AUTORES | MODALIDADE | DESTINO | SITUAÇÃO ATUAL | OBSERVAÇÕES |
|--|--|------------|--|--------------------------|----------------------------|
| Life Cycle Assessment of Rainwater Harvesting Systems for Brazilian Semi-arid Households | Thiago Barbosa; Alice Kiperstok; Eduardo Cohim | REVISTA | Water and Environment Journal Link: https://onlinelibrary.wiley.com/journal/17476593 ISSN 1747-6593 | Artigo publicado. | QUALIS: B1 Engenharia I |
| Participation of Components in the Energy Intensity of Rainwater Harvesting Systems | Hamilton Neto; Thiago Barbosa; Jálvaro da Hora; Eduardo Cohim; Adriano Leão; Samuel Sipert | REVISTA | A definir | Revisão final do artigo. | |
| Avaliação Energética de Poços Rasos para Abastecimento Doméstico | Thiago Barbosa; Bruna Azevedo; Eduardo Cohim | REVISTA | Águas Subterrâneas. Link: https://aguassubterraneas.abas.org ISSN 0101-7004 | SUBMETIDO. Em avaliação. | QUALIS: B2 Engenharia I |
| Minimização da Intensidade Energética no Abastecimento de Água de uma Residência | Thiago Barbosa; Bruna Azevedo; Eduardo Cohim | REVISTA | Ambiente Construído. Link: http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido INSS 1678-8621 | SUBMETIDO. Em avaliação. | QUALIS: B2 Engenharia I |

2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA PARA RESIDÊNCIAS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

O aumento da demanda de água em áreas urbanas vem resultando em maior consumo de energia em sistemas centralizados de abastecimento, em que são implantadas infraestrutura para atender às demandas de volumes e/ou qualidades requeridas. Uma das alternativas para minimizar o gasto energético é a utilização de sistemas descentralizados, como a água da chuva. No entanto, esses sistemas também consomem materiais e energia e, portanto, é necessário avaliar seus impactos ambientais. O presente trabalho tem como objetivo avaliar e comparar as intensidades energéticas em diferentes configurações de sistemas de captação de águas pluviais, em domicílios localizados em Feira de Santana/BA, nordeste do Brasil. A contribuição de cada componente do sistema na intensidade energética foi encontrada, bem como a consideração da energia de *feedstock* na disposição final de resíduos. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi aplicada para verificar a Demanda Acumulada de Energia (CED) de sistemas com diferentes áreas de captação e volumes de reservatórios. Os resultados mostraram que áreas de captação maiores reduzem a intensidade de energética devido ao aumento da produtividade do sistema. Por outro lado, o aumento do volume do reservatório reduz inicialmente a intensidade de energia, atinge um ponto ideal entre $1,0 \times 10^3 \text{ L}$ – $2,5 \times 10^3 \text{ L}$ de capacidade e aumenta novamente.

Palavras-chaves: Demanda de Energia Acumulada, intensidade energética, economia de água

ABSTRACT

The increase in water demand in urban areas has resulted in higher energy consumption in centralized supply systems, where major infrastructure is implemented to meet volume and/or quality demands. One of the alternatives for minimizing the energy expenditure is the use of decentralized systems, such as rainwater. However, these systems also consume material and energy and therefore, it is necessary to evaluate their environmental impacts. The present work aims to evaluate and compare energy intensities in different setups of rainwater harvesting systems, in households located in Feira de Santana/BA, northeast of Brazil. The contribution of each component in the energy intensity of the system was recorded, as well the feedstock energy of the materials in the final waste disposal. Life Cycle Assessment (LCA) was applied to verify the cumulative energy demand (CED) of systems with different catchment areas and reservoir volumes. Larger catchment areas reduce the energy intensity due to the increase in productivity of the system. On the other hand, increasing reservoir volume initially reduces energy intensity, reaches an optimal point between $1,0 \times 10^3 \text{ L}$ until $2,5 \times 10^3 \text{ L}$ capacity, then increases.

Keywords: Cumulative Energy Demand, Energy Intensity, Water Saving

2.1 INTRODUÇÃO

Água e energia os recursos estão intrinsecamente conectados e são ambos cruciais para o desenvolvimento econômico. Enquanto a produção de energia precisa de volumes de água (HERATH *et al.*, 2011; LEE *et al.*, 2018), a energia é utilizada para bombear, tratar e distribuir água, para depois coletar e limpar as águas residuais. As consequências dessa interação são os impactos ambientais, como a escassez de água e a emissão de gases de efeito estufa associados aos sistemas de abastecimento de água (HAMICHE; STAMBOULI; FLAZI, 2016).

A maioria das cidades desenvolveram seus sistemas de água urbana seguindo abordagens centralizadas (HARDY *et al.*, 2015). Para atender às crescentes demandas, a retirada de água vem sendo realizada a longas distâncias das cidades, consumindo grande quantidade de energia e materiais. Além disso, a centralização pode resultar em maiores perdas de água devido a vazamentos frequentes. A gestão da oferta baseada na expansão destes sistemas provou ser ineficiente, antieconômica, insustentável e, portanto, incapaz de suportar o aumento do consumo de água. (NAIR *et al.*, 2014).

O uso de energia é um dos principais indicadores de impactos ambientais, pois é responsável por grande parte das emissões de gases de efeito estufa (CONNOR, 2010). A avaliação da intensidade energética é um indicador de desempenho, que pode ser usado para comparar sistemas, a fim de verificar qual das alternativas tem o menor impacto no ambiente e auxiliar na tomada de decisão.

As limitações dos sistemas centralizados de água são ainda mais relevantes em locais que sofrem com a escassez de água. No Brasil, esse problema era restrito ao semiárido nordestino, mas agora é recorrente no Sul e no Sudeste, devido à distribuição heterogênea do recurso e da população, ao alto consumo de água e à poluição da água (ANA, 2016).

Para aumentar a disponibilidade de água e reduzir a pressão sobre os recursos naturais, foram investigadas e implementadas fontes alternativas, são estas a dessalinização e sistemas descentralizados, como a reúso de águas cinzas, a captação de água subterrânea e de águas pluviais. Enquanto o abastecimento descentralizado de água parece ser uma opção mais sustentável quando comparado a sistemas centralizados, este também consome energia para produzir os materiais (fase de construção) e para operação (fase de

uso) e, portanto, os impactos decorrentes de tais sistemas também devem ser considerados.

A implementação de Sistemas de Aproveitamento de Água de Chuva (SAAC) tem sido investigada com o objetivo de avaliar a eficiência e a sustentabilidade da economia de água (GHISI; BRESSAN; MARTINI, 2007; SILVA; SOUZA; CARVALHO, 2015; FONSECA *et al.*, 2017). Neste contexto, vários autores aplicaram a metodologia de avaliação do ciclo de vida para quantificar os impactos ambientais do SAAC (CRETZAZ *et al.*, 1999; MITHRARATNE; VALE, 2006; RETAMAL *et al.*, 2009; MARINOSKI; GHISI, 2011; ANGRILL *et al.*, 2012; GHIMIRE *et al.*, 2014; MALINOWSKI *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2018).

Em alguns casos, apenas a energia operacional foi considerada como a intensidade de energia do sistema. Assim, a energia incorporada dos materiais não foi contabilizada (CHIU; LIAW; CHEN, 2009; VIEIRA; GHISI, 2016). Outros não consideraram a disposição final de resíduos e energia de *feedstock* (CRETZAZ *et al.*, 1999; MITHRARATNE; VALE, 2006; MARINOSKI; GHISI, 2011), que não é compatível com as tendências atuais de gestão de resíduos sólidos e redução da exploração de recursos.

Em menor extensão, a contribuição dos componentes na intensidade de energia do sistema foi avaliada (MITHRARATNE; VALE, 2006; GHIMIRE *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2016). Esses resultados poderiam auxiliar na tomada de decisões de materiais que exigem menos energia em sua fabricação, o que poderia estimular a produção de materiais mais sustentáveis.

No Brasil existem poucos estudos que avaliam a intensidade energética no SAAC (VIEIRA *et al.*, 2014; VIEIRA; GHISI, 2016; SILVA *et al.*, 2016), alguns dos quais têm limitações, como fronteiras geográficas e de sistema.

O presente estudo tem como objetivo avaliar e comparar a intensidade energética em diferentes tipos de SAAC em domicílios localizados em Feira de Santana/BA, nordeste do Brasil, região semiárida, com o maior número de cisternas de águas pluviais no país. Para preencher a lacuna de trabalhos anteriores, a contribuição dos materiais para a intensidade energética do SAAC é detalhada e a energia de *feedstock* durante a etapa de disposição de resíduos é considerada.

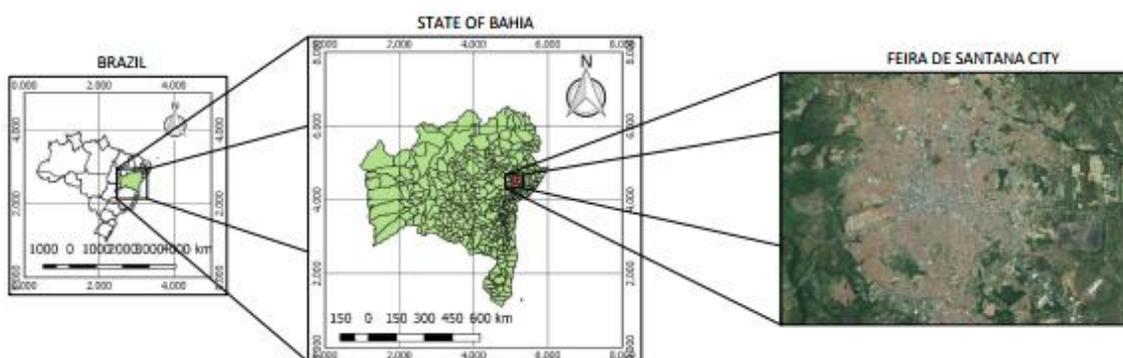
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Estudo de caso

Feira de Santana está localizada na região semiárida do nordeste brasileiro e representa um importante centro comercial que concentra a segunda maior população do estado da Bahia (IBGE, 2018).

O Sistema de Abastecimento de Água (SAA) em Feira de Santana é centralizado e bombeia água a uma distância de 30 Km, devido ao alto consumo e baixa qualidade da água dos rios que fazem fronteira com a cidade, o que exige grandes quantidades de energia e infraestrutura materiais. Na **Figura 2.1** –é apresentada a ilustração da localização da cidade (12°16'00" S, 38°58'00"W).

Figura 2.1 – Localização da cidade de Feira de Santana.



Fonte: autores, 2018.

2.2.2 Coleta de dados

Os dados da precipitação foram coletados na estação meteorológica localizada em Feira de Santana, latitude -12,18, longitude -38,96 e código 83221, de 01/01/1998 a 31/12/2012 (INMET, 2018). Nesse período, a precipitação média foi de 703 mm·ano⁻¹.

De acordo com a empresa de abastecimento de água do município (EMBASA, 2018), os dados médios locais de consumo de água foram 120 L·(pessoa·dia)⁻¹ servindo 206.154 residências. Para este trabalho, foi considerada uma população de 4 pessoas por domicílio, com uma demanda de 480 L·(residência·dia)⁻¹.

2.2.3 Sistemas de captação de água de chuva

Basicamente, um SAAC consiste em um tanque de armazenamento e componentes auxiliares, ou seja, área de captação, condutores, filtro, bomba e tubulações para fornecer a água com sistema pressurizado ou através de um reservatório superior. A instalação de reservatório superior é obrigatória em residências brasileiras devido ao fornecimento intermitente de água.

Devido ao consumo de água potável ser o menor uso em uma residência (HEINRICH, 2006; MINISTRY OF HEALTH, 2014; BOTELHO, 2013), considerou-se que todos os usos poderiam ser atendidos com a água da chuva neste estudo.

A produção de água de chuva foi estimada pela **Equação (1)** e foi adotado como coeficiente de escoamento (C) o valor de 0,80.

$$Q_{(t)} = P_{(t)} \cdot C \cdot A \quad \text{Equação (1)}$$

Em que $Q_{(t)}$ é a produção de água (m^3); $P_{(t)}$ é a precipitação (mm); C é o coeficiente de escoamento; e A é a área de captação (m^2).

O cálculo dos fluxos de massa do sistema de captação de águas pluviais foi realizado utilizando o modelo comportamental proposto por Fewkes (2000), em que descreve a operação dos reservatórios usando algoritmos, apresentados na **Equação (2)** e **(3)**.

$$Y_{(t)} = \min \left\{ \begin{array}{l} D_{(t)} \\ v_{(t-1)} + \theta Q_{(t)} \end{array} \right\} \quad \text{Equação (2)}$$

$$V_{(t)} = \min \left\{ \begin{array}{l} (V_{(t-1)} + Q_{(t)} - \theta Y_{(t)}) - (1 - \theta) Y_{(t)} \\ R - (1 - \theta) Y_{(t)} \end{array} \right\} \quad \text{Equação (3)}$$

Em que $Y_{(t)}$ corresponde ao rendimento de armazenamento (m^3); $D_{(t)}$ demanda de água; $V_{(t)}$ ao volume de água armazenada; θ é o parâmetro que varia de 0 a 1; e R é o volume do reservatório.

Considerando um valor próximo das condições reais de operação do sistema, com o uso de um reservatório superior, o coeficiente adotado para θ foi 0.6.

Foram analisados os balanços de massa de água de reservatórios em diferentes configurações de SAAC. O estudo foi então realizado considerando as áreas de captação

com 50 m², 80 m², 100 m², 120 m², 150 m² e 250 m² e reservatórios com capacidades de 500 L, 1.000 L, 1.750 L, 2.500 L, 5.000 L, 10.000 L e 15.000 L.

Os materiais utilizados nos componentes do sistema foram Policloreto de Vinil (PVC) para tubulações e calha, reservatórios de Polietileno de Alta Densidade e bomba, na qual possui componentes como cobre e aço.

O dimensionamento dos condutores verticais e das instalações hidráulicas, referentes às tubulações, foram baseados em normativos brasileiros.

2.2.4 Energia operacional

A energia necessária para o funcionamento dos sistemas foi calculada de acordo com a **Equação 4**.

$$E = 0,00273 \frac{HV}{\eta} \quad \text{Equação (4)}$$

Em que, E é a energia consumida (kWh), H é a altura manométrica (m), V é o volume de água bombeado (m³) e η é a eficiência média do sistema de recalque. Neste estudo, o rendimento de 40% foi considerado, pois bombas deste porte possuem eficiência desta ordem.

2.2.5 Análise do Ciclo de Vida

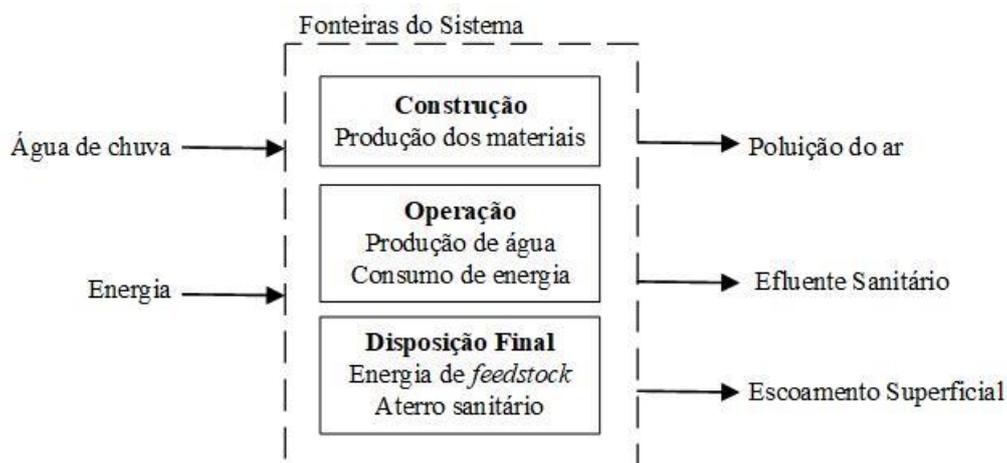
A ferramenta Análise do Ciclo de Vida (ACV) foi aplicada para avaliar a intensidade energética e os impactos ambientais da instalação dos SAAC, considerando os fluxos de energia e materiais em um determinado período. O processo de ACV consiste na definição do objetivo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. Estes passos são descritos abaixo.

Para modelagem dos sistemas propostos, foi utilizado o software Simapro 8, adotando-se a base de dados do Ecoinvent 3.3 e avaliadas as respectivas intensidades energéticas.

2.2.6 Definição dos objetivos e escopo

O objetivo foi definido como a avaliação da intensidade energética em diferentes SAAC, para domicílios situados em Feira de Santana, Brasil. O limite do sistema foi determinado da seguinte forma: etapas de fabricação e montagem dos materiais utilizados, instalação do sistema e operação e disposição de resíduos (**Figura 2.2 –**).

Figura 2.2 – Fronteiras do sistema de captação de água de chuva.



Fonte: autores, 2018.

A fase de transporte dos materiais foi desconsiderada, uma vez que estudos demonstraram que, para esses sistemas, o transporte tem pouca participação (ANGRILL *et al.*, 2012).

A unidade funcional adotada foi de 1 m³ de água produzida pelo sistema. Os diferentes SAAC foram comparados com a mesma unidade funcional, considerando a energia total utilizada para operação e produção dos materiais utilizados nos sistemas durante o período de análise. A vida útil adotada foi de 25 anos para os componentes dos sistemas.

Na fase de descarte, a energia de *feedstock* foi considerada, uma vez que parte da energia embutida no material pode ser usada para produzir novo material. Os valores proporcionais do PVC e do polietileno de alta densidade adotado neste estudo foi de 71% e 36%, respectivamente, de acordo com o inventário de carbono e energia (Hammond; Jones, 2008).

2.2.7 Inventário

Informações foram coletadas sobre a massa e energia das várias fases do ciclo de vida dentro do limite estabelecido. Para realizar a análise, foram considerados a produção do SAAC, seus componentes e seus respectivos materiais e quantidades.

2.2.8 Avaliação do impacto

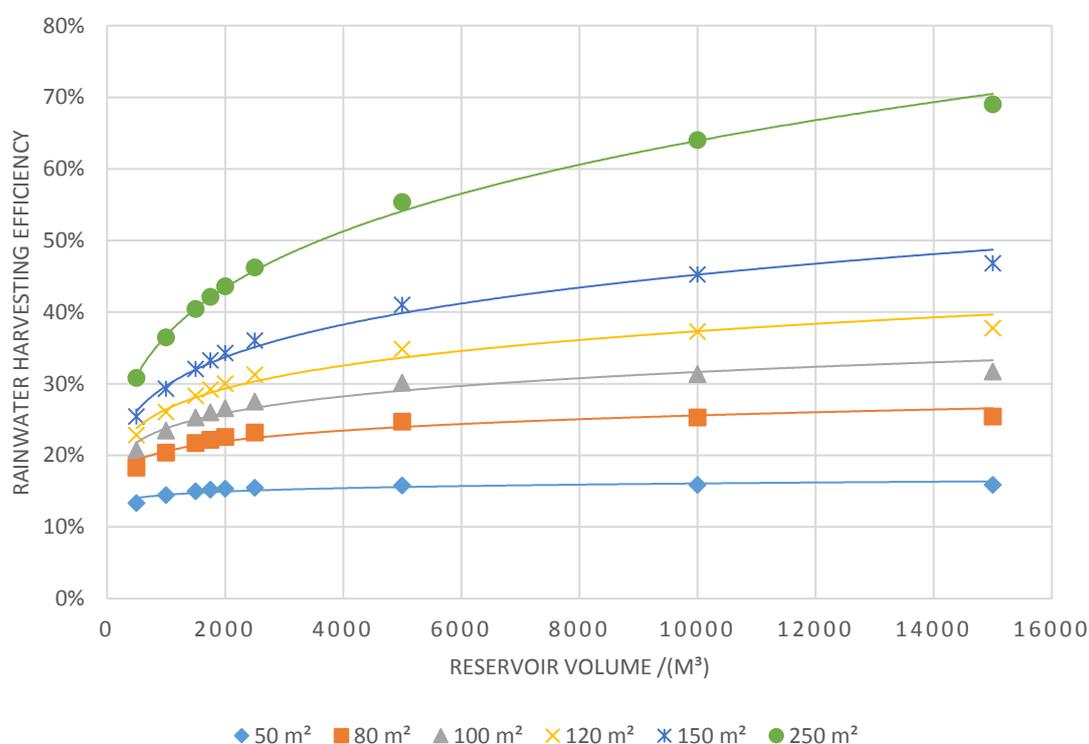
O método de Demanda de Energia Acumulada (CED) foi utilizado para comparar a demanda de energia primária entre os sistemas analisados. Neste contexto, a eletricidade de baixa voltagem foi usada para fornecer energia a bomba.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Potencial de economia de água potável

O potencial de economia de água potável do SAAC é definido como a razão entre a produção de água e a demanda de água. A **Figura 2.3** apresenta as eficiências para as diferentes áreas de captação e capacidades de reservatório.

Figura 2.3 - Potencial de economia de água com o uso do aproveitamento de água da chuva de acordo com os diferentes volumes de reservatório e área de captação de 50 m² (azul escuro); 80 m² (laranja); 100 m² (cinza); 120 m² (amarelo); 150m² (azul claro); 250 m² (verde).



Fonte: autores, 2018.

Nenhum dos volumes de reservatórios avaliados foi capaz de atender toda a demanda de água da residência. Isso depende da área de captação e do volume do reservatório. Quanto maior a área de captação, maior será a produção de água.

As curvas de produção em função do volume têm um padrão logístico com eficiências reduzidas com o aumento da reserva, tendendo a um valor máximo. Isto é evidente na curva da área de captação de 50 m², onde de 2.000 a 15.000 litros de capacidade não há aumento observado na eficiência de colheita.

2.3.2 Demanda de Energia Acumulada

Enquanto o balanço de itens no inventário do SAAC é padronizado, o tamanho do reservatório varia de acordo com as condições pré-estabelecidas. Nessa situação, o aumento do volume do reservatório sem aumentar a produção de água do sistema leva a valores elevados de CED que parecem artificiais e irrealistas, comprometendo a análise.

Por esse motivo, algumas configurações dos sistemas foram removidas da análise de energia. Os resultados da intensidade energética do SAAC são apresentados na **Tabela 2.1**.

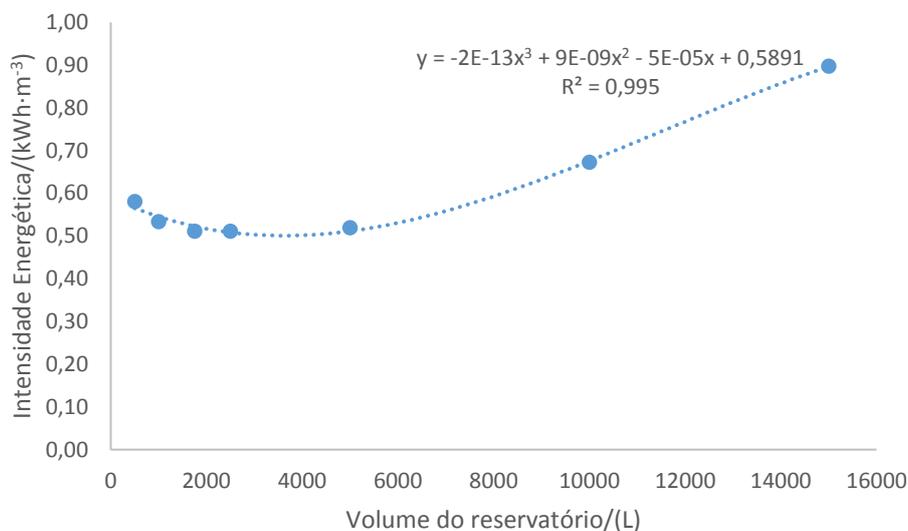
Tabela 2.1 – Intensidade Energética dos sistemas.

| Área de captação (m ²) | Intensidade energética (kWh·m ⁻³) de acordo com os volumes de reservatórios | | | | | | |
|------------------------------------|---|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | 500 L | 1000 L | 1750 L | 2500 L | 5000 L | 10000 L | 15000 L |
| 50 | 0,89 | 0,90 | - | - | - | - | - |
| 80 | 0,71 | 0,69 | 0,72 | - | - | - | - |
| 100 | 0,66 | 0,63 | 0,64 | 0,68 | - | - | - |
| 120 | 0,62 | 0,60 | 0,60 | 0,62 | 0,69 | - | - |
| 150 | 0,59 | 0,56 | 0,56 | 0,57 | 0,62 | 0,86 | - |
| 250 | 0,58 | 0,53 | 0,51 | 0,51 | 0,52 | 0,67 | 0,90 |

Fonte: autores, 2018.

Às maiores áreas de captação promoveram as menores intensidades energéticas para todos os volumes de reservatórios, isto é, devido ao fato de que a produção de água dos sistemas afeta a intensidade energética. Os valores intermediários dos volumes dos reservatórios (1.000 L - 2.500 L) apresentaram o menor CED para todas as áreas de captação, exceto 50 m². Para cada área, é possível identificar um ponto ótimo, que pode fornecer água com a menor intensidade energética. Isto pode ser observado nos valores de intensidade de energia para a área de captação de 250 m², que estão apresentados na **Figura 2.4**. Para as áreas de captação com 50 m² e 80 m², o reservatório com 500 L e 1.000 L promoveram a menor intensidade energética, para 100 m², 120 m² e 150 m² a cisterna com 1.000 L e 17.50 L apresentaram as menores intensidades energéticas e 250 m² o mínimo foi com o reservatório variando de 1000 L até 5000 L.

Figura 2.4 – Intensidade Energética para a configuração de SAAC com área de captação de 250 m².



Fonte: autores, 2018.

Em um estudo conduzido por Guanais, Cohim and Medeiros (2017), a metodologia de ACV foi aplicada para identificar a intensidade energética em um Sistema de Abastecimento de Água (SAA) urbano de Feira de Santana. A intensidade energética total do SAA foi de 3,51 kWh·m⁻³, considerando apenas a fase de uso. Todas as configurações de SAAC aqui analisadas apresentaram CED menor, sugerindo uma superioridade ambiental da água da chuva em relação a do sistema urbano.

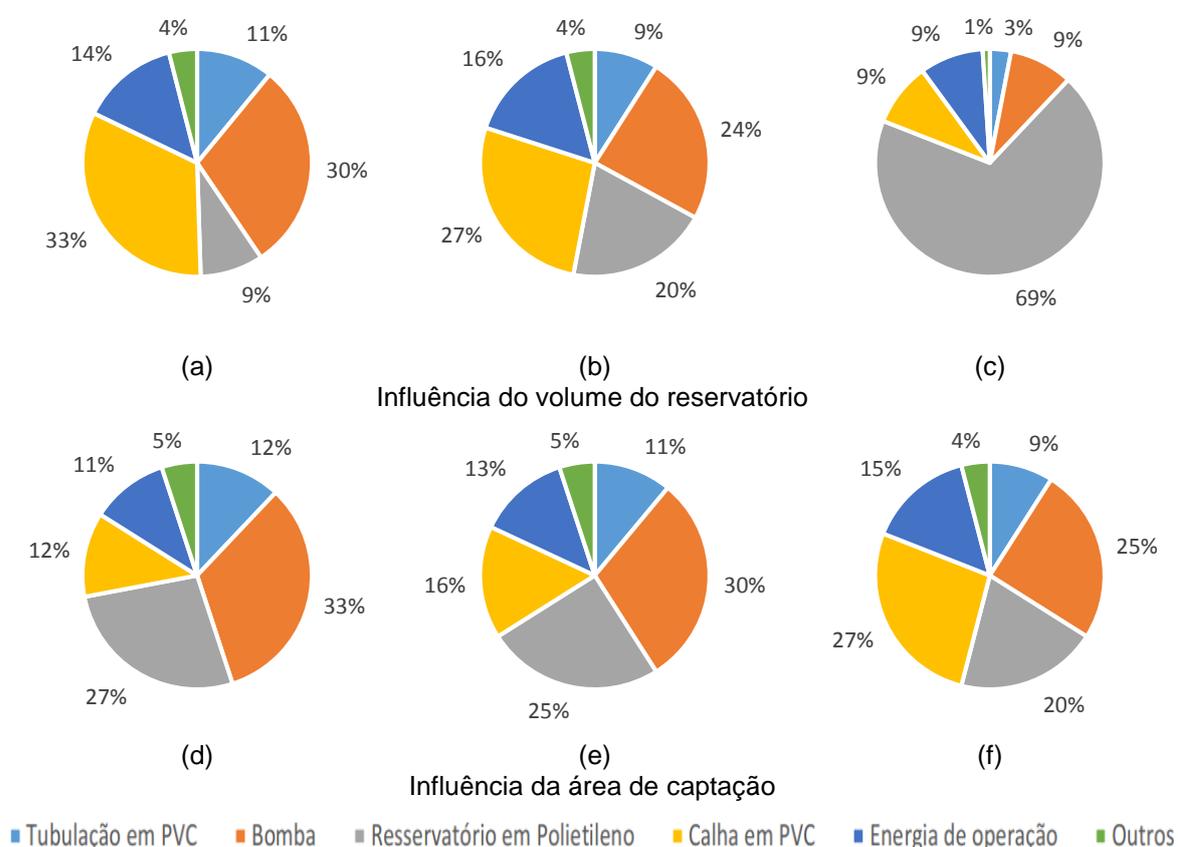
Marinoski and Ghisi (2011) utilizaram a ACV para avaliar a viabilidade de sistemas alternativos de abastecimento de água, considerando a demanda de água de 384,9 L·dia⁻¹ e o período de análise de 20 anos. Para o sistema de captação de águas pluviais, adotou-se o reservatório de 3.000 L e a intensidade energética deste sistema foi de 4,0 kWh·m⁻³.

O SAAC avaliado por Ghimire *et al.* (2014) com área de captação de 220 m² e volume de reservatório de 6.300 L, resultaram em uma intensidade energética de 1,61 kWh·m⁻³, valor superior ao encontrado em condições semelhantes neste trabalho. Essa maior intensidade pode estar relacionada ao uso de um sistema pressurizado de abastecimento. Em tais sistemas, o consumo de energia durante o *start-up* e *over-run* da bomba é superior ao período médio de operação. Sistemas que exigem uma ativação constante da bomba exigiriam, portanto, mais energia (TJANDRAATMADJA *et al.*, 2012). De acordo com Ward (2010), a utilização de sistemas com gravidade e bombas eficientes, poderiam reduzir a energia utilizada na fase de uso

Além do reduzido uso da bomba, o menor CED encontrado neste trabalho pode estar associado à energia de *feedstock* na fase de descarte, o que não foi contabilizado em nenhum dos estudos citados anteriormente e contribui para a redução da intensidade energética do sistema. O coprocessamento na recuperação de materiais e energia a partir de resíduos reduz o impacto ambiental e deve se tornar uma prática comum no futuro, com a crescente escassez de recursos e o desenvolvimento de novas tecnologias.

As contribuições dos componentes em suas respectivas energias incorporadas ao CED dos sistemas foram analisadas. Os resultados das configurações representativas do SAAC são apresentados na Figura 2.5, para mostrar a influência do volume e da captação do reservatório nesta contribuição. Para o primeiro, é apresentado um reservatório com área de 250 m² e reservatórios de 500 L (a), 2.500 L (b) e 15.000 L (c). Para este último, as configurações do sistema escolhido foram um reservatório de 1.750 L e áreas de 80 m² (d), 120 m² (e) e 250 m² (f).

Figura 2.5 – Contribuição de materiais e energia da fase de uso na intensidade energética do SAAC com as seguintes configurações.



Fonte: autores, 2018.

Para investigar a influência do volume do reservatório: 250 m² de área de captação e volumes de reservatório de (a) 500 L, (b) 2.500 L, (c) 15.000 L. Para verificar a influência das áreas de captação: volume de reservatório de 1.750 L e áreas de captação (d) 80 m², (e) 120 m², (f) 250 m².

Devido à grande contribuição da energia incorporada dos materiais, a energia operacional em todos os sistemas foi baixa, variando de 9% a 16%. Esse resultado é inferior ao observado em um fornecimento direto, em que obteve 40% de um SAAC, principalmente relacionado ao bombeamento (GHIMIRE *et al.*, 2014). Por outro lado, o uso de bombas não é necessário em um SAAC, no qual o reservatório pode ser colocado abaixo do telhado, não necessitando de energia operacional (ANGRILL *et al.*, 2012). Nenhum desses valores é comparável aos encontrados para o SAA, onde mais de 90% do consumo de energia está associado à fase de uso. Isso está associado à maior produção de água e à captação de água a longa distância (BUCKLEY; FRIEDRICH, 2011; GUANAIS, COHIM; MEDEIROS, 2017).

Em alguns casos, a energia incorporada nos materiais para um SAAC doméstico não é considerada, devido à suposição de que a energia operacional seria maior do que a energia incorporada (CHIU, LIAW; CHEN 2009; VIEIRA; GHISI, 2016). Provavelmente devido a estudos anteriores que utilizarem fornecimento direto no SAAC ou este ser comparado ao SAA. Isso não foi verificado no presente trabalho em função da baixa produtividade e do uso de um reservatório superior no SAAC. A adoção de um reservatório superior, isenta a necessidade de bombeamento constante, reduzindo assim o uso de energia.

Os principais fatores que contribuíram para as intensidades energéticas nos SAAC avaliados, foram os materiais utilizados para a construção do sistema. Reservatório, bomba e calha juntos representam mais de 70% do total de CED dos sistemas avaliados (

Figura 2.5). O volume do reservatório de Polietileno de Alta Densidade tem uma maior influência nas necessidades energéticas ao manter a mesma área de captação, variando de 9% a 69% da energia total. Por outro lado, o aumento das áreas de captação leva a uma maior contribuição da calha para o total de CED. A bomba era padrão para todas as configurações, portanto sua contribuição variava de acordo com os outros materiais. Ghimire *et al.* (2014) também encontraram alta participação do reservatório e bombeamento na intensidade energética dos sistemas.

Durante a análise da contribuição dos componentes, MITHRARATNE e VALE (2006) identificaram o reservatório como o que mais contribuiu para a intensidade energética, com 84% do total. Este percentual de contribuição é próximo ao encontrado neste estudo, para o reservatório de 15.000 L com área de captação de 250 m², no qual teve uma participação de 69%. No mesmo trabalho, diferentes tipos de materiais de um reservatório de 25.000 L, concreto e plástico, foram avaliados. A intensidade de energia para o sistema com tanque de concreto foi de 0,78 kWh·m⁻³ e para o plástico foi de 1,36 kWh·m⁻³. Por outro lado, Silva *et al.* (2016) descobriram que um reservatório de polietileno de 2.500 L teve menos impacto energético do que o concreto, com 1,17 kWh·m⁻³ e 1,55 kWh·m⁻³, respectivamente.

Diferenças observadas na intensidade energética associada aos componentes podem estar associadas aos diferentes períodos de análise utilizados. A expectativa de vida comumente considerada para componentes de SAAC varia de 20 a 100 anos (MITHRARATNE; VALE, 2006; MARINOSKI; GHISI, 2011; GHIMIRE *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2016; VIEIRA and GHISI, 2016). Assim, o tempo de vida de 25 anos adotado neste trabalho é considerado adequado.

Como os reservatórios contribuem de forma significativa para a intensidade energética total do SAAC, a correlação entre a produtividade da água dos sistemas e a capacidade de armazenamento dos reservatórios foi avaliada para o sistema com área de captação de 250 m² (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - A relação entre produção e capacidade de armazenamento dos reservatórios, para um sistema com uma área de captação de 250 m²

| Volume dos reservatórios (L) | 500 | 1000 | 1750 | 2500 | 5000 | 10000 | 15000 |
|--|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Produção de água / Massa do reservatório (m ³ ·kg ⁻¹) | 4,32 | 3,04 | 2,17 | 1,69 | 1,18 | 0,60 | 0,36 |

Fonte: autores, 2018.

A relação da produção pela massa do reservatório diminui com o aumento do armazenamento, sinalizando que a eficiência diminui em cisternas com volumes maiores. Além disso, a escolha do reservatório requer uma análise econômica devido à importância de seu custo para todo o SAAC. Seu aumento de preço é em função da capacidade de

armazenamento com um comportamento linear, ou seja, quanto maior a capacidade, maior o preço Bertolo (2006).

2.3.3 Considerações finais para Feira de Santana

Para o estado da Bahia, a estimativa do número de residências é de 92% e 8% para apartamentos (IBGE, 2009). Em um estudo elaborado por Ghisi (2006), a estimativa da área média de cobertura das casas na região nordeste do Brasil foi de $19,6 \text{ m}^2 \cdot \text{pessoa}^{-1}$. Adotando a ocupação de 4 pessoas por residência, a área de cobertura da região é de aproximadamente 80 m^2 .

Utilizando essa área de cobertura, um reservatório de 1750 L, considerado economicamente viável, e um cenário de instalação de SAAC em 30% das residências, a economia prevista de água seria de $2.400.187 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ em Feira de Santana. Além disso, levaria a uma redução no consumo de energia de $6,7 \text{ GWh} \cdot \text{ano}^{-1}$, o que representa 42% da demanda de energia pela área rural do município.

2.4 CONCLUSÃO

Em todos os arranjos de SAAC avaliados, os valores de CED obtidos foram, aparentemente, inferiores aos do SAA, mesmo considerando as condições menos favoráveis, ou seja, 50 m^2 de área de cobertura e 500 L de volume do reservatório. Ao contrário do que é frequentemente assumido, a energia incorporada nos materiais teve uma contribuição maior para a intensidade de energia de todos os sistemas, quando comparada à fase de uso. Na verdade, o reservatório, calha e bomba juntos representaram mais de 70% da CED, com a distribuição varia de acordo com as configurações do sistema.

Ao considerar o mesmo volume de reservatório em uma configuração, o aumento da área de captação reduz a CED total enquanto aumenta a produtividade do sistema. Diferentemente, mantendo a mesma área, a intensidade energética inicialmente diminui e depois aumenta com as capacidades do reservatório. Assim, um valor energético ótimo para o fornecimento pode ser identificado entre 1.000 L e 2.500 L de capacidade.

As intensidades energéticas em todos os arranjos avaliados foram menores do que as encontradas na literatura para SAAC. Independentemente da área de captação e do volume do reservatório, todas as configurações consistiam em um reservatório superior,

que requer menos energia durante a fase de uso. Além disso, a adoção da recuperação energética na fase de descarte contribuiu para a redução do CED.

Juntos, esses resultados sugerem que há um ponto ótimo para o fornecimento de SAAC e sua adoção pode ter um impacto significativo na economia de água e energia no município de Feira de Santana.

REFERÊNCIAS

- ANA. *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil*. Relatório da Agência Nacional de Águas, Brasília, Brasil, 2016.
- ANGRILL, Sara *et al.* Environmental analysis of rainwater harvesting infrastructures in diffuse and compact urban models of Mediterranean climate. *The International Journal of Life Cycle Assess*, v. 17, p. 25–42, 2012.
- BAHIA. Balanço Energético da Bahia, 2017. Relatório da Secretaria de Infraestrutura da Bahia, Salvador, Brasil, 2018.
- BERTOLO, Elisabete de Jesus Peres. Aproveitamento da água da chuva em edificações. 2006. 204 f. Universidad do Porto, 2006.
- BOTELHO, Gabriela Laura Peixoto. *Avaliação do Consumo de Água em Domicílios: Fatores intervenientes e metodologia para setorização dos usos*. 2013. 2015 f. Universidade Federal da Bahia, 2013.
- BUCKLEY, Chris; FRIEDRICH, Elena. Life-cycle assessments in the South African water sector : A review and future challenges. *Water SA*, v. 37, n. 1077, p. 719–726, 2011.
- CHIU, Yie-ru; LIAW, Chao-hsien; CHEN, Liang-ching. Optimizing rainwater harvesting systems as an innovative approach to saving energy in hilly communities. *Renewable Energy*, v. 34, n. 3, p. 492–498, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.016>>.
- CONNOR, Peter A O. *Energy Transitions*. Boston University ed. Boston, Massachusetts, 2010.
- CRETTAZ, P *et al.* Life cycle assessment of drinking water and rain water for toilets flushing. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, v. 48, n. 3, p. 73–83, 1999.
- EMBASA. Controle Operacional de Água e Esgoto do município de Feira de Santana para o ano de 2016. Relatório da Companhia de Água e Esgoto de Feira de Santana, Bahia, Brasil, 2018.
- FEWKES, Alan. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. *Urban Water*, v. 1, n. 1999, p. 323–333, 2000.
- FONSECA, Carlos Roberto *et al.* Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns. *Journal of Cleaner Production*, v. 145, p. 323–335, 2017.
- GHIMIRE, Santosh R *et al.* Life Cycle Assessment of Domestic and Agricultural Rainwater Harvesting Systems. *Environmental Science & Technology*, v. 48, p. 4069–4077, 2014.
- GHISI, Enedir. Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. *Building and Environment*, v. 41, p. 1544–1550, 2006.
- GHISI, Enedir; BRESSAN, Diego Lapolli; MARTINI, Maurício. Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil. *Building and Environment*, v. 42, p. 1654–1666, 2007.
- GUANAIS, Ana Luiza Rezend; COHIM, Eduardo Borges; MEDEIROS, Diego Lima.

Avaliação energética de um sistema integrado de abastecimento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 6, p. 1187–1196, 2017.

HAMICHE, Ait Mimoune; STAMBOULI, Amine Boudghene; FLAZI, Samir. A review of the water-energy nexus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 65, p. 319–331, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.020>>.

HAMMOND, Geoff; JONES, Craig. *INVENTORY OF CARBON & ENERGY (ICE)*. Universidade de Bath, 2008.

HARDY, Devon *et al.* *Alternative Water Resources: A Review of Concepts, Solutions and Experiences*, 2015.

HEALTH, Ministry of, Ministry of. The selection , operation and maintenance of individual. Relatório do Ministério da Saúde, Nova Zelândia, 2014.

HEINRICH, Matthias. Residential Water End Use. Relatório do BRANZ, Nova Zelândia, 2006.

HERATH, Indika *et al.* The water footprint of hydroelectricity: A methodological comparison from a case study in New Zealand. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 14, p. 1582–1589, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.05.007>>.

IBGE (2009) Séries históricas estatísticas: características dos domicílios para o período de 2001-2009. Disponível em: <https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=PD206>. Acesso em 20 de Abril de 2018.

IBGE (2010) Censo demográfico do Brasil do ano de 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/feira-de-santana/panorama>. Acesso em 20 de Abril de 2018.

INMET (2018) Dados pluviométricos da cidade de Feira de Santana dentre os anos de janeiro de 1998 até dezembro de 2012. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em 12 de março de 2018.

LEE, Uisung *et al.* Regional water consumption for hydro and thermal electricity generation in the United States. *Applied Energy*, v. 210, p. 661–672, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.025>>.

LI, Yi *et al.* Multi-objective optimization integrated with life cycle assessment for rainwater harvesting systems. *Journal of Hydrology*, v. 558, p. 659–666, 2018.

MALINOWSKI, Patricia A. *et al.* Energy-Water Nexus : Potential Energy Savings and Implications for Sustainable Integrated Water Management in Urban Areas from Rainwater Harvesting and Gray-Water Reuse. *Jornal of Water Resources Planning and Management*, p. 1–10, 2015.

MARINOSKI, A K; GHISI, E. Assessment of the environmental impact and investment feasibility analysis of rainwater use in houses. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, v. 148, p. 391–402, 2011.

MITHRARATNE, Nalanie; VALE, Robert. Life-Cycle Resource Efficiency of Conventional and Alternative Water Supply Systems. 12th Annual International

Sustainable Research Conference, April, Hong Kong, p. 6-8, 2006.

NAIR, Sudeep *et al.* Water-energy-greenhouse gas nexus of urban water systems: Review of concepts, state-of-art and methods. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 89, p. 1–10, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.05.007>>.

RETAMAL, Monique *et al.* *The Water-Energy Nexus: Investigation Into The Energy Implications of Household Rainwater Systems*. Institute for Sustainable Futures, p. 1-83, University of Technology, Sydney, 2009, 2009.

SILVA, Cristina Matos; SOUSA, Vitor; CARVALHO, Nuno Vaz. Resources , Conservation and Recycling Evaluation of rainwater harvesting in Portugal : Application to single-family residences. “*Resources, Conservation & Recycling*”, v. 94, p. 21–34, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.11.004>>.

SILVA, Hamilton de Araújo *et al.* Avaliação do ciclo de vida do abastecimento de água residencial com captação fluvial pela concessionária comparado a captação pluvial in loco. 2016, Fortaleza: p. 350–355, 2016.

TJANDRAATMADJA, Grace *et al.* *Optimisation of Energy Use in Household Rainwater Supply Systems. Urban Water Security Research Alliance Technical Report*. . [S.l: s.n.], 2012.

VIEIRA, A S; GHISI, E. Water – energy nexus in houses in Brazil : comparing rainwater and gray water use with a centralized system. *Water Science & Technology: Water Supply*, v. 16, n. 2, p. 274–283, 2016.

VIEIRA, Abel S *et al.* Energy intensity of rainwater harvesting systems : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 34, p. 225–242, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.012>>.

WARD, Sarah Louise. *Rainwater harvesting in the UK : a strategic framework to enable transition from novel to mainstream*. Tese de Doutorado, University of Exter, Exter, United Kingdom, 2010. Disponível em: <<https://ore.exeter.ac.uk/repository/handle/10036/106575> (accessed 09 april 2018)>.

3 PARTICIPAÇÃO DOS COMPONENTES NA INTENSIDADE ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA

RESUMO

O uso de fontes descentralizadas de água vem oferecendo uma alternativa aos desafios no abastecimento de água sob restrições ambientais. Dada a importância da questão, realizamos uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de diferentes componentes em Sistemas de Aproveitamento de Água de Chuva (SAAC) para a utilização doméstica comumente encontrados no Brasil para estimar seu Potencial de Aquecimento Global (GWP) e Intensidade Energética (IE). Os modelos consistiram em combinações de diferentes materiais de reservatório (tijolo, polietileno, fibra de vidro e concreto), três materiais de calha (PVC, aço galvanizado e alumínio) e duas fontes de eletricidade (painel fotovoltaico e matriz brasileira), além de tubos de PVC e uma bomba. Esses sistemas foram comparados com o abastecimento municipal de água potável em Feira de Santana, Brasil. Nossa avaliação utilizou a base de dados Ecoinvent 3.4 aplicando o método IPCC (2013) para estimar o GWP, bem como a Demanda de Energia Acumulada (CED) para IE no programa Simapro. O melhor cenário promoveu a intensidade energética de 0,66 kWh·m⁻³, com emissão de 120 g de CO₂ eq·m⁻³, já o pior cenário de intensidade de 1,73 kWh·m⁻³, com emissão de 1870 g de CO₂ eq·m⁻³. A fase de construção correspondeu a mais de 80% de contribuição na IE dos sistemas. O uso do reservatório de concreto levou aos maiores impactos ambientais, quando comparado com os outros componentes.

Palavras-chaves: Água da chuva, avaliação do ciclo de vida, potencial de aquecimento global, demanda de energia, intensidade energética

ABSTRACT

The use of decentralized sources of water has been offering an alternative to the challenges in water supply under environmental constraints. Given the importance of the issue, we conducted a Life Cycle Assessment (LCA) of different components in Rainwater Harvesting Systems (RWHS) for domestic use commonly found in Brazil to estimate their Global Warming Potential (GWP) and Energy Demand (ED). The models consisted in combinations of for different tank materials (brick, polyethylene, fiber glass and concrete), three gutter materials (PVC, galvanized steel and aluminum) and two electricity sources (photovoltaic panel and Brazilian grid), in addition to PVC pipes and a pump. We compared such systems with the municipal drinking water supply in Feira de Santana, Brazil. Our assessment used Ecoinvent 3.4 database applying IPCC (2013) method to estimate GWP as well as Cumulative Energy Demand (CED) for ED in Simapro program. The best scenario promoted the energy intensity of 0.66 kWh·m⁻³, with emission of 120 g of CO₂ eq·m⁻³, already the worst intensity scenario of 1.73 kWh·m⁻³, with emission of 1870 g of Co₂ eq·m⁻³. The construction phase corresponded to more than 80% contribution in the energy intensity of the systems. The use of concrete tank led to the highest environmental impacts among the other components.

Keywords: Rainwater harvesting system, life cycle assessment, global warming potential, energy demand, energy intensity

3.1 INTRODUÇÃO

A água é essencial para a manutenção da vida humana e do meio ambiente. A crescente demanda por água nas áreas urbanas, juntamente com as pressões causadas pelas atividades antrópicas e os efeitos nos sistemas hidrológicos resultantes das mudanças climáticas, apresenta desafios para o abastecimento de água e para o meio ambiente.

O primeiro centro populacional e os sistemas de abastecimento de água se desenvolveram onde a água estava disponível (RICHTER *et al.*, 2018). Segundo o Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais dos Estados Unidos (UNDESA, 2012), 3,6 bilhões de pessoas estão vivendo em áreas urbanas no mundo e espera-se um aumento de 2,6 bilhões até 2050. A demanda por água deve aumentar não apenas para suprir o crescimento populacional, mas também para atender à tendência de desenvolvimento econômico.

A ONU estima, através do Relatório de Avaliação Ecológica do Milênio, um aumento de cerca de 30% na demanda de água, que será necessária para abastecer a população mundial até 2030 (HASSAN *et al.*, 2005). Este relatório também aponta que o uso global de água doce já excedeu 5 a 25% da oferta disponível para longo prazo. No entanto, a humanidade ainda tem usado água para necessidades biológicas e atividades produtivas desordenadas, aumentando o esgotamento e afetando a qualidade das fontes de água.

Enfrentando esse problema, tem havido um crescente interesse por abordagens de gestão de água que promovam sistemas descentralizados de abastecimento de água como alternativa para fins não potáveis (SCHOEN; GARLAND, 2017). Em regiões de escassez de água, isso é especialmente importante devido ao potencial de reduzir a pressão sobre os sistemas de abastecimento de água potável. Sistemas de Aproveitamento de Água de Chuva (SAAC) têm sido cada vez mais adotados como alternativa de abastecimento de água para fins domésticos, proporcionando benefícios como a diminuição dos impactos no meio ambiente e na saúde humana, bem como fluxos de escoamento de águas pluviais (GHIMIRE *et al.*, 2014).

A pesquisa sobre o SAAC tem desenvolvido a conscientização sobre os benefícios de tal fonte de água, com importantes estudos recentes explorando os melhores volumes de reservatórios (CHIU *et al.*, 2009; CAMPISANO; MODICA, 2012), análises econômicas (ANAND; APUL, 2011), potencial para economia de água (GHISI *et al.*, 2007), qualidade da água e riscos para a saúde (HORA *et al.*, 2017), impactos hidrológicos

(GIRES *et al.*, 2015) e intensidade energética. Entre esses assuntos, o nexos entre a água e a energia associada à Intensidade de Energia (IE) é o mais importante nas questões de mudanças climáticas, pois está diretamente ligado à emissão de gases de efeito estufa.

Atender à crescente demanda por água é um problema significativo, mas a sustentabilidade é de igual interesse, fontes alternativas não devem apenas possibilitar o aumento do suprimento de água, mas também possibilitar a redução da emissão de poluentes no meio ambiente (BARBOSA, AZEVEDO, COHIM; no prelo). O SAAC pode ser construído com diferentes materiais e designs. As escolhas dessas configurações devem ser feitas de maneira completa para evitar sistemas que consumam grandes quantidades de energia na fabricação de materiais e para operar o sistema.

Poucos estudos indicaram a participação de materiais na IE de sistemas ou abordaram a importância de escolher os componentes e como isso poderia ajudar a tornar os sistemas mais sustentáveis. Este estudo tem como objetivo investigar diferentes estruturas de SAAC tradicionalmente encontradas no Brasil, demonstrando a participação de cada componente na intensidade energética dos sistemas avaliados.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O método de avaliação ambiental aplicado foi a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), baseado na NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). Este estudo foi realizado em quatro etapas: definição de meta e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados de acordo com a norma.

O modelo utilizado foi a ACV, uma vez que o sistema pode ser observado e medido. Permite ligar processos individuais dentro da tecnosfera ao longo do fluxo de matéria, energia e serviços.

Para avaliação dos sistemas, foi utilizado o programa Simapro® versão 8, adotando a base de dados Ecoinvent® 3.4. Para estimar as emissões de CO₂-eq, aplicou-se o método do Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC), de 100 anos, bem como a Demanda de Energia Acumulada (CED 2014), para estimar a intensidade energética.

Este estudo foi baseado em um único domicílio localizado em Feira de Santana, BA. Para a região onde a residência está localizada, a área de cobertura média é de 80 m². Estudos anteriores (BARBOSA; KIPERSTOK; COHIM, no prelo) demonstraram que para esta área o volume de reservatório que apresentou o melhor rendimento foi de 1750 L, no qual

este foi o volume escolhido para análise neste estudo. A intensidade de energia prevista foi de $0,72 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$. Para avaliar o balanço de massa de água no reservatório, **Equações (1) e (2)** foram utilizadas.

$$Y_{(t)} = \min \left\{ \begin{array}{l} D_{(t)} \\ v_{(t-1)} + \theta Q_{(t)} \end{array} \right\} \quad \text{Equações (1)}$$

$$V_{(t)} = \min \left\{ \begin{array}{l} (V_{(t-1)} + Q_{(t)} - \theta Y_{(t)}) - (1 - \theta)Y_{(t)} \\ R - (1 - \theta)Y_{(t)} \end{array} \right\} \quad \text{Equações (2)}$$

Em que $Y_{(t)}$ corresponde a volume aproveitado (m^3); $D_{(t)}$ demanda de água; $V_{(t)}$ ao volume de água armazenada; θ é o parâmetro que varia de 0 a 1 (adotado de 0,6); e R é o volume do reservatório.

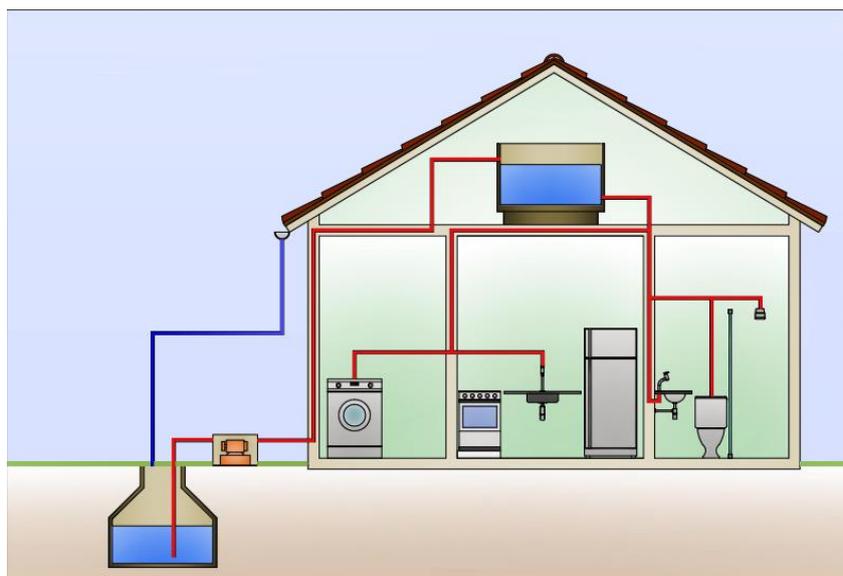
Os dados de precipitação foram coletados na estação meteorológica instalada no município, no período de 01/01/1998 a 31/12/2012 (INMET, 2018). A demanda de água adotada foi de $120 \text{ L}\cdot(\text{pessoa}\cdot\text{dia})^{-1}$ e a ocupação de 4 pessoas em residência.

Depois de definir o objeto de estudo, a fase de objetivo e escopo da ACV foi realizada, juntamente com a definição da aplicação pretendida, cenários, a unidade funcional, o limite do sistema e as entradas de inventário.

3.2.1 Escopo

Foram avaliadas diferentes configurações SAAC. Os modelos consistiram em uma estrutura para coletar, transportar, armazenar e bombear a água da chuva para usos não-potáveis em um domicílio de baixa renda com um pavimento (**Figura 3.1**).

Figura 3.1 – Esquema de Sistema de Aproveitamento de Água de Chuva



Fonte: autores, 2018.

A água da chuva é coletada por calhas, foram analisados dois materiais: aço galvanizado, cloreto de polivinila (PVC) e alumínio. A água é conduzida através de tubos de PVC para o tanque de armazenamento no nível do solo. Foram analisados quatro materiais para construção do reservatório: tijolo, polietileno, fibra de vidro e concreto armado.

Um reservatório superior foi utilizado, devido a ser comum seu uso no país. Utilizou-se tubo de PVC para transportar a água da chuva do reservatório inferior ao reservatório superior. A bomba escolhida foi centrífuga com 75 watts de potência e 40% de eficiência. Para estimar a energia utilizada para fornecer água, foi utilizado a **Equação (3)**.

$$E = P \cdot t \cdot \eta \quad \text{Equação (3)}$$

Onde E é a energia consumida (kWh), t é o tempo de operação do sistema de elevação e η é a eficiência.

Diferentes fontes de eletricidade foram analisadas no painel fotovoltaico e na rede elétrica brasileira convencional (baixa tensão).

3.2.2 Unidade funcional

A unidade funcional adotada foi de 1,0 m³ de água fornecida.

3.2.3 Fronteiras do sistema

A fronteira do sistema contempla três fases da implantação, operação e disposição de resíduos. O ciclo de vida da produção de matérias-primas, o consumo de água, o uso de energia e a energia da matéria-prima foram considerados na fase de descarte. A energia de *feedstock* foi utilizada para tubos de PVC, calha de PVC, aço galvanizado e alumínio e cisterna de polietileno.

A vida útil do sistema adotada foi de 25 anos, pois esta é a vida útil da maioria dos componentes e é um período comum em que reformas e reparos são realizados nas estruturas das residências.

3.2.4 Análise do inventário

Devido à escassez de inventários nacionais de materiais de construção, utilizou-se o Inventário Ecoinvent, ajustando o máximo possível a realidade brasileira e priorizando o uso de inventários médios globais aplicados (GLO e ROW). Reunimos os dados de entrada para avaliação de impacto associada à produção de PVC, bomba, polietileno, aço galvanizado, alumínio, alvenaria, concreto armado, fibra de vidro, eletricidade da rede elétrica brasileira e painel fotovoltaico, da base de dados Ecoinvent 3.4. O inventário é apresentado na **Tabela 3.1** –.

Tabela 3.1 – Dados de entrada do inventário

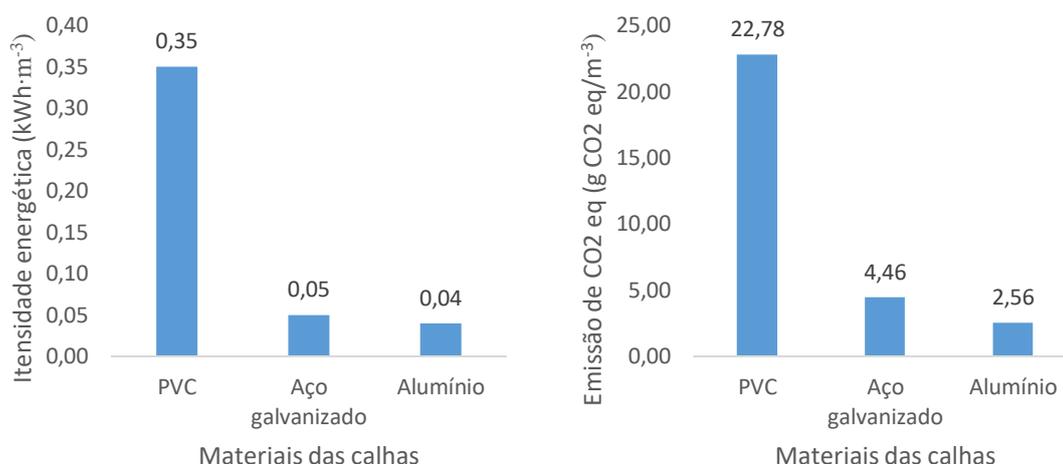
| Item | Massa /(kg) | Processo/Material |
|--------------------------------|----------------|--|
| Reservatório de concreto | 265 | Cement, Portland {RoW} production Alloc Def, S |
| | 907 | Sand {RoW} gravel and quarry operation Alloc Def, S |
| | 881 | Gavel crushed {RoW} production Alloc Def, S |
| | 68 | Reinforcing steel {GLO} Market for Alloc Def, S |
| | 11 | Sawnwood, hardwood, raw, air dried {RoW} market for Alloc Def, S |
| Reservatório de alvenaria | 249 | Clay brick {RoW} production Alloc Def, S |
| | 248 | Cement, Portland {RoW} production Alloc Def, S |
| | 997 | Sand {RoW} gravel and quarry operation Alloc Def, S |
| | 500 | Gavel crushed {RoW} production Alloc Def, S |
| | 39 | Reinforcing steel {GLO} Market for Alloc Def, S |
| Reservatório de polietileno | 34 | Polyethylene, high density, granulate {RoW} production Alloc Rec, U |
| Reservatório de fibra de vidro | 23 | Polyester resin, unsaturated {RoW} production Alloc Def, S |
| | 8 | Glass fibre {RoW} production Alloc Def, S |
| Calha de PVC | 7 | Polyvinylidenchloride, granulate {RoW} production Alloc Def, S |
| Calha de aço galvanizado | 7 | Steel, low-alloyed {RoW} steel production, converter, low-alloyed Alloc Def, S |
| Calha de alumínio | 3 | Aluminium, primary, ingot {IAI Area, South America} aluminium production, primary, ingot Alloc Def, S |
| Tubulação de PVC | 8 | Polyvinylidenchloride, granulate {RoW} production Alloc Def, S |
| Bomba | 3 | Pump, 40W {CH} production Alloc Def, U |
| Filtro folha em PVC | 1 | Polyvinylidenchloride, granulate {RoW} production Alloc Def, S |
| Item | Uso /(kWh) | Processo/Material |
| Energia fotovoltaica | 36 | Electricity, low voltage {RoW} electricity production, fotovoltaic, 3kWp flat-roof installation, single-Si Alloc Def, S |
| Matriz energética brasileira | 36 | Electricity, low voltage {BR} market for Alloc Def, S |

Fonte: autores, 2018.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o impacto da escolha de componentes do SAAC em suas respectivas intensidades energéticas. Os resultados obtidos para o material da calha são mostrados na **Figura 3.2**.

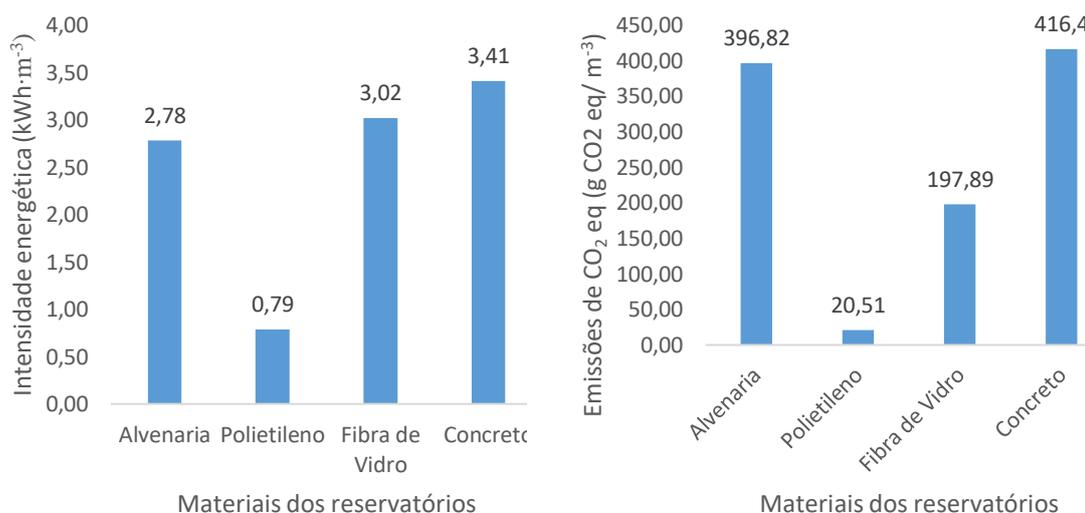
Figura 3.2 – Intensidade energética e emissões de CO₂ eq para calhas.



Fonte: autores, 2018.

A calha de PVC apresentou a maior intensidade energética e foi a que mais contribuiu para a emissão de CO₂. A adoção do *feedstock*, na fase de descarte de resíduos, possibilitou a recuperação de maior quantidade de energia a partir dos materiais de aço galvanizado e alumínio. Embora o alumínio e o aço galvanizado possuam valores de intensidade energética próximos, nas emissões de CO₂ o alumínio foi o menos impactante, devido à menor emissão de poluentes para sua fabricação. Os reservatórios foram analisados e apresentados na **Figura 3.3**.

Figura 3.3 – Intensidade energética e emissões de CO₂ eq para os reservatórios.



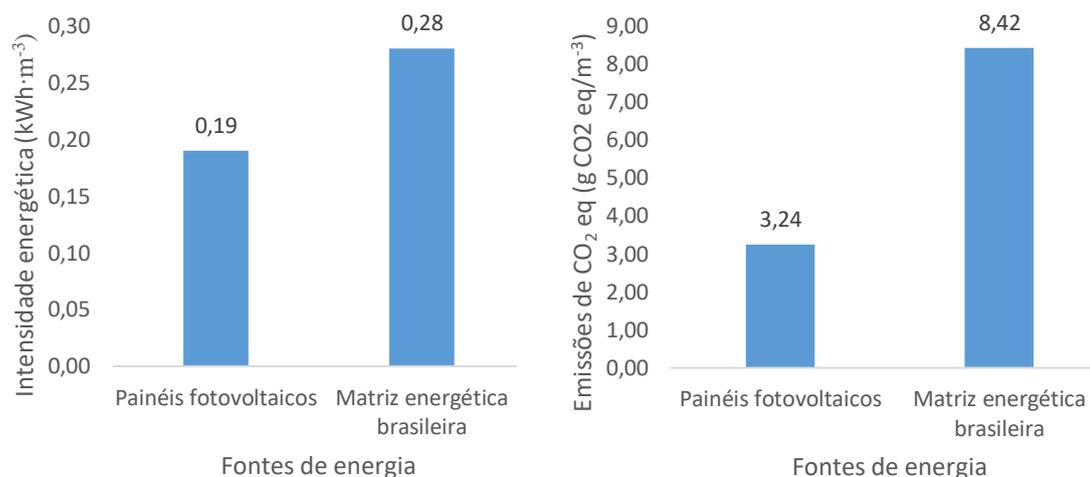
Fonte: autores, 2018.

O reservatório de polietileno foi o menos intensivo avaliado. Dentre as cisternas avaliadas, a massa de polietileno foi a menor, significando que este material permite armazenamento com menor uso de recursos. A capacidade de recuperação de energia do polietileno, com a adoção do *feedstock*, na fase de disposição de resíduos contribuiu para redução da intensidade, em que esse cenário não foi considerado para os demais reservatórios, devido à baixa capacidade de recuperação.

O reservatório de concreto foi o mais intensivo, principalmente devido ao uso de cimento que é um material muito intensivo, este insumo também foi o principal contribuinte do reservatório de alvenaria. A segunda opção de cisterna mais intensiva foi a de fibra de vidro, na qual a maior contribuição intensiva foi a da resina de poliéster.

Foram avaliadas duas fontes de energia, os painéis fotovoltaicos e a rede elétrica brasileira. Eles são apresentados na **Figura 3.4**.

Figura 3.4 – Intensidade energética e emissões de CO₂ eq para as fontes energéticas.



Fontes: autores, 2018.

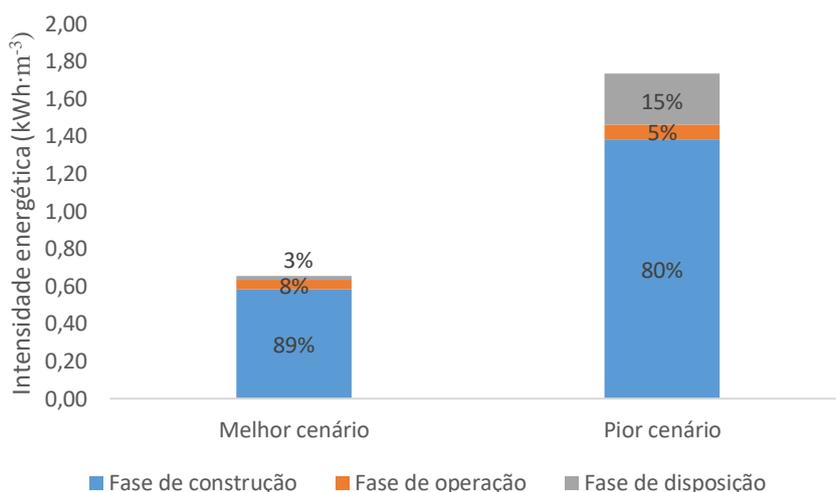
O cenário fotovoltaico apresentou a menor intensidade energética e promoveu menor impacto na emissão de CO₂ do que a energia fornecida pela matriz elétrica brasileira. Apesar de ser menos intensiva, a instalação de sistema descentralizado de fornecimento de energia elétrica por painéis fotovoltaicos, possibilita a não utilização de materiais presentes na rede de transmissão e distribuição de energia, diferentemente do que acontece na rede brasileira. A matriz energética do país possui intensidade inferior quando comparada com outros sistemas pelo mundo, isso poderia ser explicado pelo fato de que

até 2016, cerca de 82% da oferta interna de eletricidade no Brasil foi gerada por fontes renováveis (EPE, 2017).

Após a descoberta da intensidade energética de cada componente do sistema, foi proposto a criação de dois cenários. O melhor cenário com os componentes de menor intensidade, e o pior cenário, com os componentes mais intensivos, para demonstrar a importância da escolha do material na redução da intensidade energética dos sistemas.

O melhor cenário é composto por calha de alumínio, reservatório de polietileno, energia fornecida por painéis fotovoltaicos, tubos de PVC e bomba. O pior cenário é composto por calha de PVC, reservatório de concreto, energia fornecida pela matriz energética brasileira, tubos de PVC e bomba. A participação das fases de construção, operação e disposição de resíduos é apresentada na **Figura 3.5**.

Figura 3.5 – Participação da intensidade energética nas fases de construção, operação e disposição de resíduos dos sistemas.



Fonte: autores, 2018.

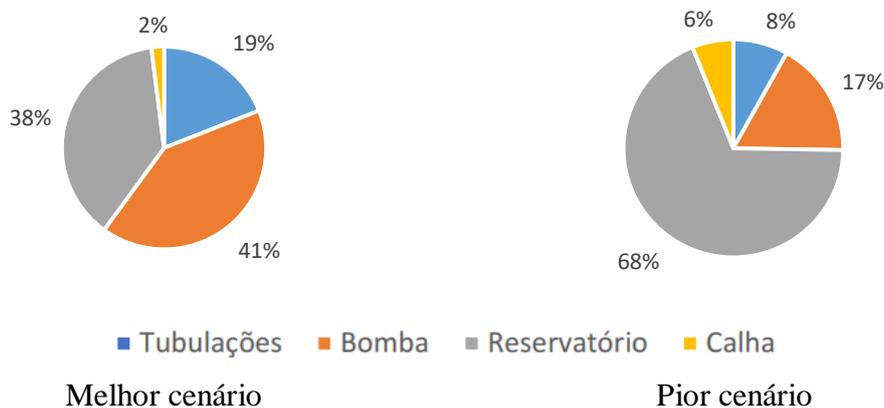
Conforme observado por Barbosa, Kiperstok e Cohim (no prelo), a fase de construção foi mais intensa do que a de operação e disposição de resíduos nos dois cenários. O melhor cenário foi o que obteve a intensidade energética final de 0,66 kWh·m⁻³, com emissão de CO₂ equivalente de 120 g·m⁻³, e o pior cenário de 1,73 kWh·m⁻³, com emissão de CO₂ equivalente de 1870 g CO₂·m⁻³.

A intensidade energética encontrada no melhor cenário foi menor que a encontrada por Barbosa, Kiperstok e Cohim (no prelo), intensidade de 0,72 kWh·m⁻³ nas mesmas condições de área de captação, demanda e volume do reservatório, o que pode demonstrar ganho de eficiência energética com a escolha destes componentes. Se comparado ao pior

cenário, o melhor cenário é duas vezes e meia menos intensivo e emite 15 vezes menos carbono do que o pior cenário, Figura 3.5.

Como a fase de construção foi a mais intensiva, a intensidade energética de cada componente é apresentada na **Figura 3.6**.

Figura 3.6 – Intensidade energética dos componentes dos sistemas avaliados.



Fonte: autores, 2018.

No melhor cenário, os componentes que tiveram maior participação foram a bomba e o reservatório, representando juntos uma contribuição de 79% na IE da fase de implantação. No pior cenário, o mesmo foi observado, no entanto, apenas o reservatório contribuiu com 68%, o que pode ser associado aos resultados de intensidade de energia mais altos. A escolha do tanque de concreto em vez de polietileno produziu um CED mais alto do que outras opções como calha de PVC ou de alumínio, ou mesmo painéis fotovoltaicos ou rede elétrica.

Tabela 3.2 – Comparação da intensidade energética com outros estudos.

| Estudo de caso | Potencial de Aquecimento Global de emissão de CO ₂ equivalente (kg · m ⁻³) | Intensidade energética (kWh · m ⁻³) | Referencia |
|---|---|---|---------------------------------------|
| RWHS in Feira de Santana - BA, Brazil | - | 0.51 – 0.90 | Barbosa, Kiperstok e Cohim (no prelo) |
| Urban Water Supply, Feira de Santana – BA, Brazil | 0.29. | 3.51 | Guanais et al. (2017) |
| Domestic RHS in Roanoke, Virginia, USA | 0.41 | 1.61 | Ghimire et al. (2014) |
| Compact urban model RHS with pumping in Europe | 1.20 | 2.10 | Angrill et al. (2011) |

Fonte: autores, 2018.

Em comparação com o abastecimento de água potável municipal, o melhor e o pior cenário apresentaram menor intensidade energética do que o sistema de abastecimento urbano, com 3,51 kWh·m⁻³. O modelo com o menor impacto associado é significativamente vantajoso, com 81% menor CED por m³.

Em comparação com estudos relacionados, a maioria dos resultados são da mesma ordem de grandeza (**Tabela 3.2**). Podemos destacar que, em alguns casos, o material do tanque foi o mais impactante e o SAAC teve um desempenho melhor do que o sistema municipal de abastecimento de água, semelhante ao nosso estudo de caso.

Ghimire *et al.* (2014) conduziu uma ACV para o CED e o aquecimento global em um SAAC doméstico com infraestrutura mínima e uso de energia. Eles descobriram que o sistema superou o sistema municipal de água potável em Roanoke, Virgínia, EUA. As maiores emissões de CO₂ eq e CED foram associadas à bomba de eletricidade e a vida útil do tanque de polietileno.

Angrill *et al.* (2011) avaliou diferentes cenários na Europa para modelos urbanos difusos (unifamiliar separados de dois andares) e compactos (cinco andares de 24 apartamentos) com gravidade ou sistema de bombeamento. A ACV mostrou que menores impactos ambientais foram associados aos sistemas para os edifícios compactos.

3.4 CONCLUSÃO

O uso de Sistemas de Aproveitamento de Água de Chuva (SAAC) como fonte descentralizada apresentou grande potencial para melhorar o uso sustentável da água e diminuir os impactos das mudanças climáticas e da demanda energética, se comparado ao sistema urbano de água do município analisado.

Dentro dos ciclos de vida dos sistemas, a fase de construção tem alta contribuição para o impacto geral. Portanto, a escolha de materiais tem uma grande importância na intensidade energética dos sistemas.

A calha de alumínio foi a menos impactante, quando comparada com a de PVC e aço galvanizado. Painéis fotovoltaicos produzem impactos menores do que a matriz energética brasileira, mas não de forma significativa, uma vez que a maior parte do fornecimento nacional de eletricidade é gerada por fontes renováveis.

A escolha do material do tanque foi determinante para as categorias de impacto avaliadas. Os maiores impactos podem ser associados aos modelos de tanques de concreto. Essa

escolha de projeto pode ser considerada na intervenção e proposição de sistemas mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISSO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISSO 14044: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2009b.
- ANAND, C.; APUL, D. S. Economic and environmental analysis of standard, high efficiency, rainwater flushed, and composting toilets. *Journal of Environmental Management*, v. 92, n. 3, p. 419–428, 2011.
- ANGRILL, Sara *et al.* Environmental analysis of rainwater harvesting infrastructures in diffuse and compact urban models of Mediterranean climate. p. 25–42, 2012.
- BARBOSA, T.; AZEVEDO, B.; COHIM, E. Avaliação energética de poços rasos para abastecimento doméstico. No prelo.
- BARBOSA, T. J.; KIPERSTOK, A. C.; COHIM, E. B. Life cycle assessment of rainwater harvesting systems for brazilian semi-arid households. No prelo.
- CAMPISANO, Alberto; MODICA, Carlo. Resources , Conservation and Recycling Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. “*Resources, Conservation & Recycling*”, v. 63, p. 9–16, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.03.007>>.
- CHIU, Yie-ru; LIAW, Chao-hsien; CHEN, Liang-ching. Optimizing rainwater harvesting systems as an innovative approach to saving energy in hilly communities. *Renewable Energy*, v. 34, n. 3, p. 492–498, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.016>>.
- EPE. Balanço energético nacional, 2017.
- GHIMIRE, Santosh R *et al.* Life Cycle Assessment of Domestic and Agricultural Rainwater Harvesting Systems. *Environmental Science & Technology*, v. 48, p. 4069–4077, 2014.
- GHISI, Enedir; BRESSAN, Diego Lapolli; MARTINI, Maurício. Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil. *Building and Environment*, v. 42, p. 1654–1666, 2007.
- GIRES, Auguste *et al.* Impacts of small scale rainfall variability in urban areas: a case study with 1D and 1D/2D hydrological models in a multifractal framework. *Urban Water Journal*, v. 12, n. 8, p. 607–617, 2015.
- GUANAIS, Ana Luiza Rezend; COHIM, Eduardo Borges; MEDEIROS, Diego Lima. Avaliação energética de um sistema integrado de abastecimento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 6, p. 1187–1196, 2017.
- HASSAN, Rashid; SCHOLLES, Roberto; ASH, Neville. *ECOSYSTEMS AND HUMAN WELL-BEING: WETLANDS AND WATER Synthesis*. v. 1, 2005.
- HORA, Jálvaro *et al.* Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) of Campylobacter for Roof-harvested rainwater domestic use. p. 1–10, 2017.

INMET (2018) Dados pluviométricos da cidade de Feira de Santana dentre os anos de janeiro de 1998 até dezembro de 2012. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em 12 de março de 2018.

RICHTER, BRIAN D. *et al.* Assessing the Sustainability of Urban Water Supply Systems. *Journal AWWA*, v. 2, n. February, p. 40–47, 2018. Disponível em: <onlinelibrary.wiley.com>.

SCHOEN, Mary E.; GARLAND, Jay. Review of pathogen treatment reductions for onsite non-potable reuse of alternative source waters. *Microbial Risk Analysis*, v. 5, p. 25–31, 2017.

UNDESA. *World Urbanization Prospects: The 2011 Revision*. Department of Economic and Social Affairs. Population Division. New York, 2012.

4 AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE POÇOS RASOS PARA ABASTECIMENTO DOMÉSTICO

RESUMO

O modelo atual de gestão de oferta tem provocado um crescimento no consumo energético em sistemas centralizados de abastecimento de água, contribuindo para o aumento de emissões de gases de efeito estufa. A gestão de demanda com o uso de fontes alternativas pode ser uma solução de minimização da intensidade energética destes sistemas. Este trabalho teve o objetivo de avaliar a intensidade energética do aproveitamento de água subterrânea para abastecimento de uma residência localizada em Feira de Santana/BA. Admitiu-se a limitação das retiradas como medida de conservação, e uma concepção popularmente adotada na cidade. Adotou-se a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida e a demanda de energia acumulada para avaliação de impacto. Os resultados demonstraram que intensidade energética aumenta com a profundidade, cujo principal componente para a demanda de energia é a massa de PVC usado no revestimento do poço. A bomba analisada, do tipo submersa vibratória, tem baixa eficiência, ainda assim a energia de operação teve menor contribuição para a intensidade energética da água produzida, cujos valores variaram de $1,7 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ a $3,0 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$. Em comparação com o sistema público do município e com o reúso de água cinza, a água subterrânea foi superior em termos energéticos para as profundidades de 5 m a 25 m, mas foi menos competitiva que a água de chuva.

Palavras-chaves: Avaliação do Ciclo de Vida, intensidade Energética, CED, água subterrânea, poços individuais

ABSTRACT

The current supply management model has led to an increase in energy consumption of centralized water supply systems, contributing to greenhouse gases emissions. Demand management with the use of alternative sources can be a solution to minimize the energy intensity of these systems. This present work aims to evaluate the energy intensity of the groundwater supply for a household located in Feira de Santana/BA. The limitation of withdrawals was adopted as a conservation measure of resource. The Life Cycle Assessment methodology and the accumulated energy demand was used for impact evaluation. The results showed that energy intensity increases with depth, whose main component for energy demand was the mass of PVC used in the lining of the well. The analyzed pump, of the submersed vibratory type, had low efficiency, yet the operating energy had less contribution to the energy intensity of the produced water, whose values ranged from $1.7 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ to $3.0 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$. In comparison to the urban supply system and greywater reuse, groundwater was superior in energy terms to depths of 5 m to 25 m but was less competitive than rainwater.

Keywords: Life Cycle Assessment, energy intensity, CED, groundwater, individual wells

4.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de águas urbanas se desenvolveram de forma centralizada, no entanto, embora tenham sido relativamente bem-sucedidos no passado, a capacidade de atendimentos destes sistemas frente ao crescimento populacional, processos de urbanização e desenvolvimento econômico, está sendo questionada atualmente (BROWN; KEATH; WONG, 2009; MCDONALD *et al.*, 2014; FENG *et al.*, 2017).

Em geral, tais sistemas são gerenciados pelo lado da oferta, cuja lógica é ampliar a oferta sem considerar que as demandas são passíveis de gestão. No entanto, devido ao aumento da demanda e deterioração das águas dos mananciais próximos aos consumidores, constantes investimentos em obras de infraestrutura são requeridos, assim como cresce o uso de energia para transporte de água.

A energia é necessária em várias etapas do ciclo de produção da água para o uso urbano, desde a sua extração, tratamento e distribuição, assim como a própria energia demanda elevadas quantidades água para sua geração. Essa relação inextricável vem sendo chamada de nexo água e energia (*water energy nexus*).

Quanto mais intensivo é o uso de energia no fornecimento de água, maiores são as pressões ao meio ambiente (OKADERA; CHONTANAWAT; GHEEWALA, 2014; HAMICHE; STAMBOULI; FLAZI, 2016), visto que a geração de energia é um dos principais responsáveis pela emissão de gás carbônico e metano, principais gases efeito estufa (VOINOV & CARDWELL, 2009).

Em contraposição à gestão da oferta, o modelo baseado na gestão da demanda visa a preservação da água e adota medidas de redução da demanda e inclui sistemas descentralizados com o uso de fontes alternativas próximas ao ponto de consumo. No entanto, a utilização dessas fontes não apenas aumenta a oferta de água, mas também contribuem para a mitigação da mudança climática reduzindo o uso de energia e as emissões de gases de efeito estufa (NAIR *et al.*, 2014).

Isso requer a gestão integrada das águas urbanas que considera o uso conjunto de todas as fontes além de aspectos locais, adotando um manejo que resulta em benefícios a todas as etapas do ciclo urbano da água. O aproveitamento da água de chuva, o tratamento e uso de água cinza, associado à recarga do lençol freático para uso, também, como fonte

de água, em conjunto, reduzem a pressão sobre os corpos d'água naturais, atenuam as enchentes urbanas e o volume de esgoto a ser coletado e tratado. Entretanto, é importante que seja verificada a intensidade energética associada à água produzida a partir dessas fontes descentralizadas.

A água subterrânea, quando disponível, pode ser uma importante fonte descentralizada para o abastecimento doméstico. No entanto, questões precisam ser consideradas para o seu aproveitamento como a superexploração (HUANG; SHU; YANG, 2012; SHANG *et al.*, 2016; ZOU *et al.*, 2015), subsidência (SHEN & XU, 2011; ERBAN; GORELICK; ZEBKER, 2014; LUNA *et al.*, 2017) e intrusão salina (MOUJABBER *et al.*, 2006; GOPINATH *et al.*, 2016; TOSTE; ROSMAN; FREITAS, 2017). Assim como a água de abastecimento público, o aproveitamento da água subterrânea também utiliza energia na extração de água, portanto, os impactos resultantes dessas ações devem ser avaliados.

Entretanto, apesar de diversos estudos avaliarem as intensidades energéticas do aproveitamento de água de chuva (CRETZAZ *et al.*, 1999; GHIMIRE *et al.*, 2014; BARBOSA, KIPERSTOK, COHIM; no prelo; VIEIRA & GHISI, 2016; BARBOSA, AZEVEDO, COHIM; no prelo) e reúso de água cinza (MARINOSKI *et al.*, 2012), não foram encontrados trabalhos que analisassem a intensidade energética da água produzida a partir do manancial subterrâneo para abastecimento doméstico individual, e os poucos que existem que se assemelhem com o estudo, avaliam o impacto ambiental de sistemas públicos de abastecimento ou para irrigação, sempre de grande porte.

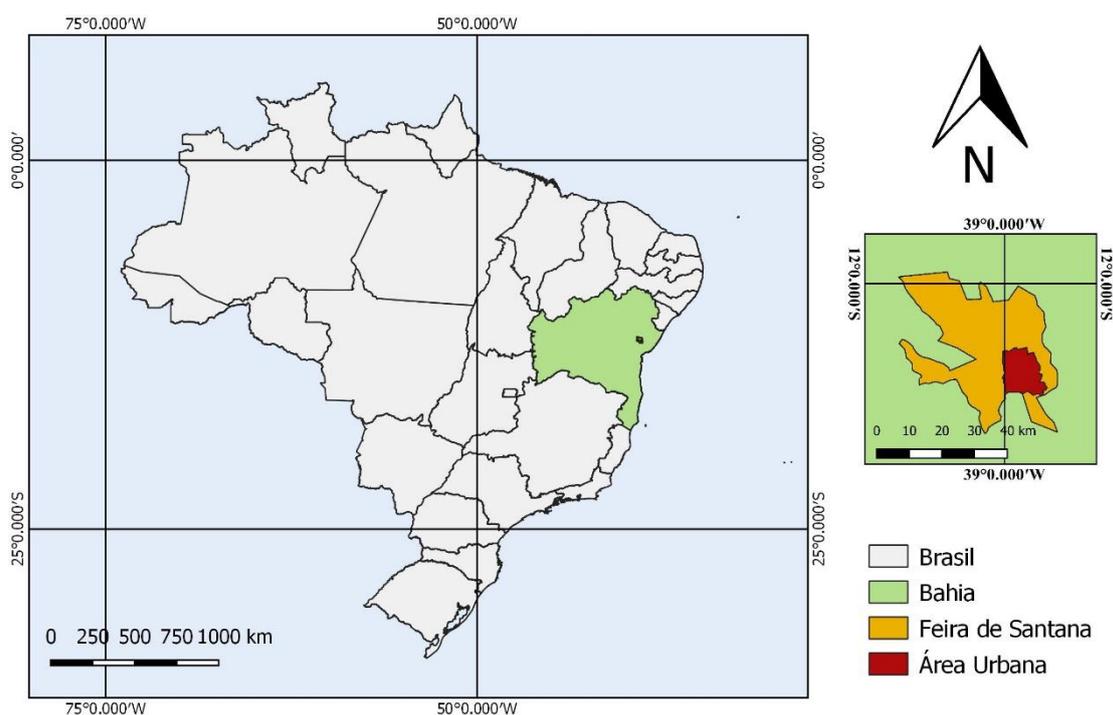
Assim, este estudo possui o objetivo de avaliar a intensidade energética de abastecimento individual com água subterrânea de residência urbana, como forma de contribuir para a tomada de decisão na gestão integrada de águas urbanas.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Local de estudo

Feira de Santana está situada no estado da Bahia, compreendida entre as coordenadas geográficas 12°09' e 12°20' S e 38°53' e 39°07' W (**Figura 4.1**), semiárido do nordeste do Brasil. O município é o segundo maior da Bahia com 556.642 habitantes, 92% das residências são unifamiliares (IBGE, 2010).

Figura 4.1 - Localização do município de Feira de Santana/BA.



Source: author, 2018.

O abastecimento de água do município é realizado a partir da captação de água na barragem de Pedra do Cavalo, bacia do rio Paraguaçu, a uma distância aproximada de 30 km. O Sistema Integrado de Abastecimento de Água (SIAA) de Feira de Santana é responsável pela retirada de 17 % do volume extraído do manancial, para abastecimento urbano (VIEIRA, 2017).

Apesar da rede de abastecimento cobrir grande parte do município, 13% dos domicílios utilizam a água subterrânea (IBGE, 2010). Feira de Santana é assentada sobre duas formações geológicas, de embasamento cristalino, constituído de gnaisses granulíticos e cobertura sedimentar ou formação de barreiras, com sedimentos inconsolidados, arenosos e argilosos com presença de cascalhos (ANJOS E BASTOS, 1968; NASSIF *et al.*, 2016).

4.2.2 Coleta de dados

A qualidade microbiológica da água subterrânea em Feira de Santana/BA foi verificada através de 629 análises realizadas no período de novembro de 1998 a outubro de 2014 no laboratório de saneamento da Universidade Estadual de Feira de Santana, encontrando-se 80% de resultados negativos para presença de coliformes termotolerantes. Sendo assim, foi considerado como uso de água subterrânea na residência para fins não potáveis.

A escolha das profundidades a serem avaliadas foi baseada na análise de sondagens, apresentadas no estudo de Nassif *et al.* (2016) e outros 13 furos, nos quais o nível d'água varia de 3,2 m a 25,4 m. Desse modo, foram adotadas profundidades de 5 m, 10 m, 15 m, 20 m e 25 m para coleta das amostras .

Os dados de precipitação foram coletados da estação meteorológica localizada no município de código 83221 e coordenadas de latitude de 12°10'48" sul e 38°57'36" oeste, para o período de 01/01/1998 a 31/12/12, cuja precipitação média anual foi de 703 mm (INMET, 2018).

4.2.3 Características do sistema de aproveitamento de água subterrânea

Para este estudo, considerou-se um lote residencial com área total de 160 m², e 80 m² de área permeável. Admitiu-se um uso médio diário de água de 120 L·(pessoa·dia)⁻¹ e uma taxa de ocupação de 4 pessoas.

O sistema avaliado é composto por poço revestido, com cimentação do fundo, proteção sanitária, bomba submersa, tubulação de recalque e reservatório superior para alimentação dos pontos de uso.

Apesar do tipo de PVC geomecânico ser o recomendado para revestimento de poços, o mais comum é o uso do PVC para instalações prediais sanitárias de esgoto, conforme a NBR 5688 (ABNT, 1999)

Considerou-se a utilização do concreto na cimentação do fundo do poço e na proteção sanitária, constituída de uma pavimentação de concreto circular de diâmetro de 2 metros e espessura de 15 centímetros.

A bomba adotada foi do tipo submersa vibratória de 300 W de potência, composta basicamente de alumínio, que, embora de baixa eficiência, tem baixo custo e é facilmente encontrada no mercado. Na **Tabela 4.1** é apresentado o desempenho da bomba para diversas profundidades.

Tabela 4.1 – Desempenho da bomba submersa vibratória.

| H / (m) | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Q / (L·h ⁻¹) | 1.400 | 1.200 | 1.050 | 940 | 850 | 770 | 700 | 620 | 550 | 500 | 450 |

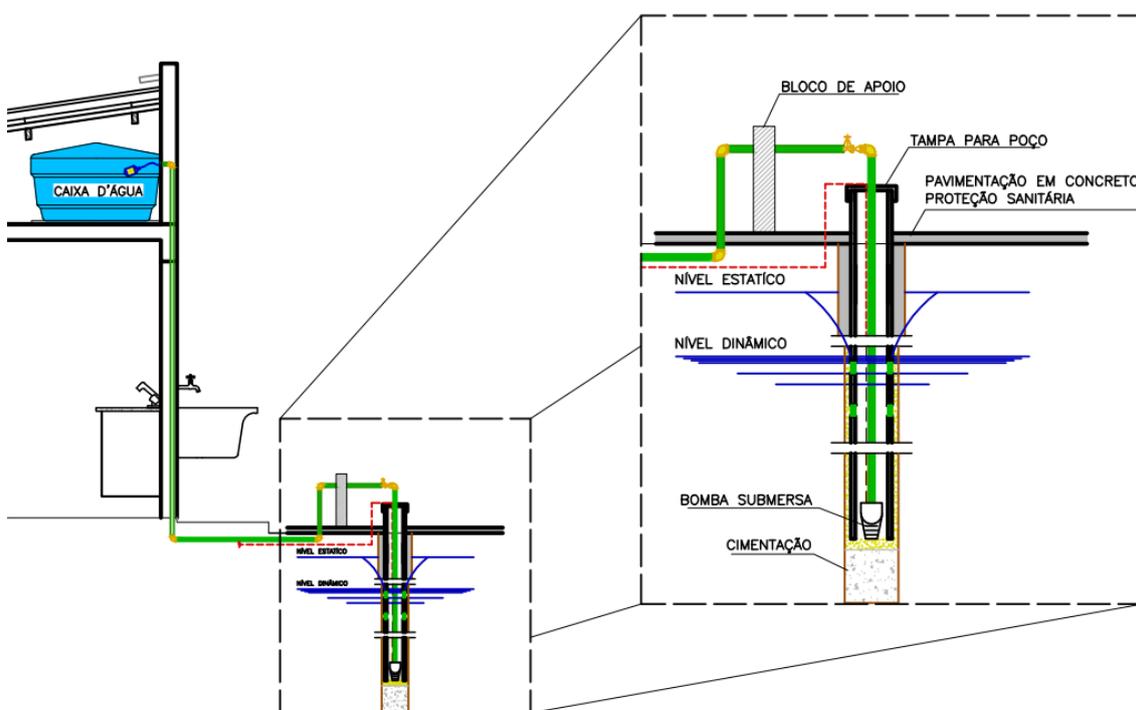
H é a altura manométrica e Q é a vazão.

Fonte: Anauger, 2018

Para o recalque da água previu-se o uso de tubulação flexível de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) até a parte superior do poço, e deste ponto até o reservatório superior foi utilizada tubulação rígida soldável em PVC, bastante utilizado em residências.

Na **Figura 4.2** é apresentado o sistema de captação de água subterrânea analisado.

Figura 4.2 – Esquema de captação da água subterrânea.



Fonte: Próprio autor, 2018.

Objetivando a conservação da reserva de água freática, admitiu-se que o volume de água retirado diariamente se limitasse à recarga, dado pela precipitação na área permeável. A estimativa do volume diário foi feita com a **Equação (1)**.

$$V_{(t)} = \frac{P_{(t)} \cdot A \cdot C}{365} \quad \text{Equação (1)}$$

Na qual $V_{(t)}$ é o volume (L) diário captado, $P_{(t)}$ (mm) é precipitação média anual, A é a área (m²) permeável do lote e C é o coeficiente de infiltração, dotado como 0,80.

Foi considerado a diferença entre o nível estático e dinâmico de 1 m.

4.2.4 Energia de operação

A estimativa de energia utilizada durante o recalque da água, foi obtida a partir da **Equação (2)**.

$$E = T \cdot P \quad \text{Equação (2)}$$

Em que E é a energia usada (kW·h), T é o tempo (h) de bombeamento e P é a potência (kW) da bomba.

4.2.5 Avaliação do Ciclo de Vida

Para estimar a intensidade energética, foi utilizada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que permite a contabilização dos fluxos de materiais e energia em um determinado período. Este estudo utiliza a abordagem do berço ao túmulo, ou seja, avalia deste a implantação do sistema até sua disposição final.

A análise seguiu as normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). Foi utilizado o software SimaPro® versão 8.4.0.0, com o banco de dados do Ecoinvent® 3.3.

4.2.5.1 Definição dos objetivos e escopo

O período de análise foi de 25 anos, correspondente ao tempo de vida da maioria dos componentes do sistema. Para a fronteira dos sistemas foram consideradas as fases de implantação, de uso e de disposição de final de resíduos.

Na etapa de implantação dos sistemas foram considerados os materiais utilizados para construção dos sistemas. Devido ao tempo de vida útil da bomba ser inferior ao período de análise, foi considerada sua substituição na metade do período.

Para a fase de uso foi adotada a energia de operação do sistema. Já na fase de destinação de resíduos, foi considerado a energia de *feedstock* (HAMMOND & JONES, 2008), em que no fim da vida útil os insumos utilizados foram reciclados para produção de novos componentes, poupando energia de extração e beneficiamento de material virgem. Foi

considerada a energia de *feedstock* dos materiais de PVC, Polietileno e alumínio da bomba.

A unidade funcional adotada foi 1 m³ de água produzido.

4.2.5.2 Análise de inventário

Foram coletadas informações relativas aos materiais utilizados na fase de implantação do sistema, apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Inventário dos sistemas avaliados de aproveitamento da água subterrânea.

| Profundidade do poço | 5 m | 10 m | 15 m | 20 m | 25 m |
|------------------------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| Componente do sistema | Quant. | M.T. (kg) | Quant. | M.T. (kg) | Quant. |
| Revestimento (/m) | 6,0 | 20,9 | 11,0 | 38,4 | 16,0 |
| Tubo de PEAD (recalque) (/m) | 6,0 | 0,8 | 11,0 | 1,5 | 16,0 |
| Tubo de PVC (recalque) (/m) | 10,8 | 2,1 | 10,8 | 2,1 | 10,8 |
| Bomba (unid.) | 1,0 | 5,0 | 1,0 | 5,0 | 1,0 |
| Reservatório 310 L (unid.) | 1,0 | 9,0 | 1,0 | 9,0 | 1,0 |
| Concreto (m ³) | 0,5 | 1228,9 | 0,5 | 1228,9 | 0,5 |

Quant. é a quantidade, M.T. é a massa total.
fonte: próprio autor, 2018.

4.2.5.3 Avaliação de impactos

O método de Demanda de Energia Acumulada (CED, no acrônimo em inglês) versão 1.09 foi utilizado para comparar a demanda de energia primária entre os sistemas analisados.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Estimativa da produção de água

A estimativa de produção de água, foi de 128 L·dia⁻¹ ou 1,1·10³ m³ para o período analisado de 25 anos, o qual atende aproximadamente 30% do consumo de água do domicílio.

4.3.2 Energia necessária na fase de uso

Para as profundidades avaliadas, foram encontrados os valores do tempo de funcionamento do sistema elevatório, consumo de energia durante a operação do sistema e rendimento, apresentados na **Tabela 4.3**.

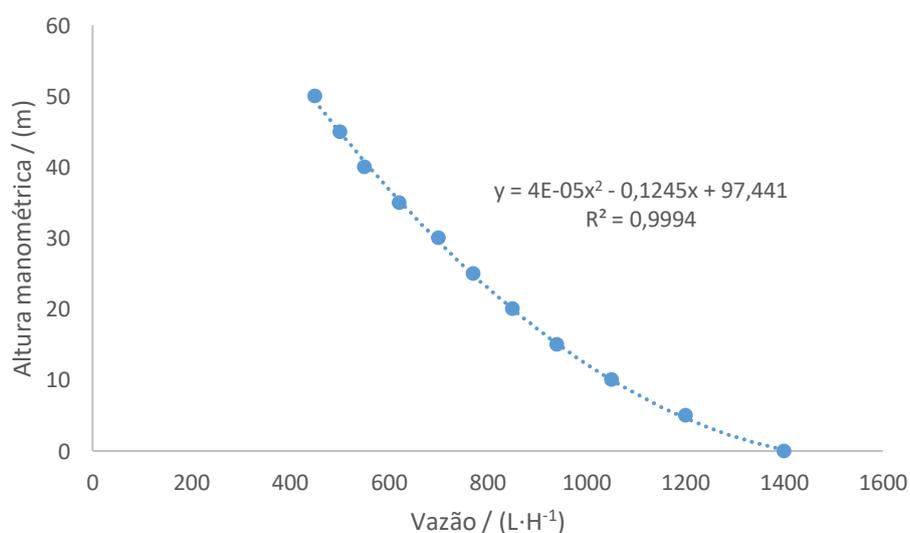
Tabela 4.3 - Vazão, tempo de funcionamento, uso de energia e rendimento dos sistemas.

| Profundidade | 5 m | 10 m | 15 m | 20 m | 25 m |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Vazão / (L·dia ⁻¹) | 127,94 | 127,94 | 127,94 | 127,94 | 127,94 |
| Tempo / (h·dia ⁻¹) | 0,110 | 0,130 | 0,140 | 0,160 | 0,180 |
| Uso de energia / (kWh·dia ⁻¹) | 0,034 | 0,039 | 0,043 | 0,048 | 0,053 |
| Rendimento (η) | 9% | 11% | 15% | 17% | 18% |

Fonte: próprio autor, 2018.

Considerando a curva de funcionamento da bomba (Figura 4.3), o consumo de energia foi proporcional ao tempo de funcionamento que, por sua vez, foi proporcional à profundidade. O sistema de recalque apresentou baixa eficiência, com valor máximo de 18%. Valores de eficiência dessa magnitude foram observados por Bastos (2015). A despeito disso, a vida útil relativamente grande da bomba, baixo custo, facilidade de manutenção e disponibilidade no mercado, e, sobretudo, o seu uso disseminado, são fatores que justificam a sua escolha.

Figura 4.3 – Curva da bomba adotada (Ecco Anauger)



Fonte: Elaborado a partir de dados fornecidos pela Anauger, 2018

4.3.3 Demanda de Energia Acumulada

Na **Tabela 4.4** são apresentados os valores das intensidades energéticas, calculados a partir da ACV utilizando o método do CED, para as diferentes profundidades de captação.

Tabela 4.4 - Intensidade energética dos sistemas dos sistemas de aproveitamento de água subterrânea avaliados.

| Profundidade | 5 m | 10 m | 15 m | 20 m | 25 m |
|--|------|------|------|------|------|
| Intensidade Energética / (kWh·m⁻³) | 1,74 | 2,04 | 2,35 | 2,66 | 2,97 |

Fonte: próprio autor, 2018.

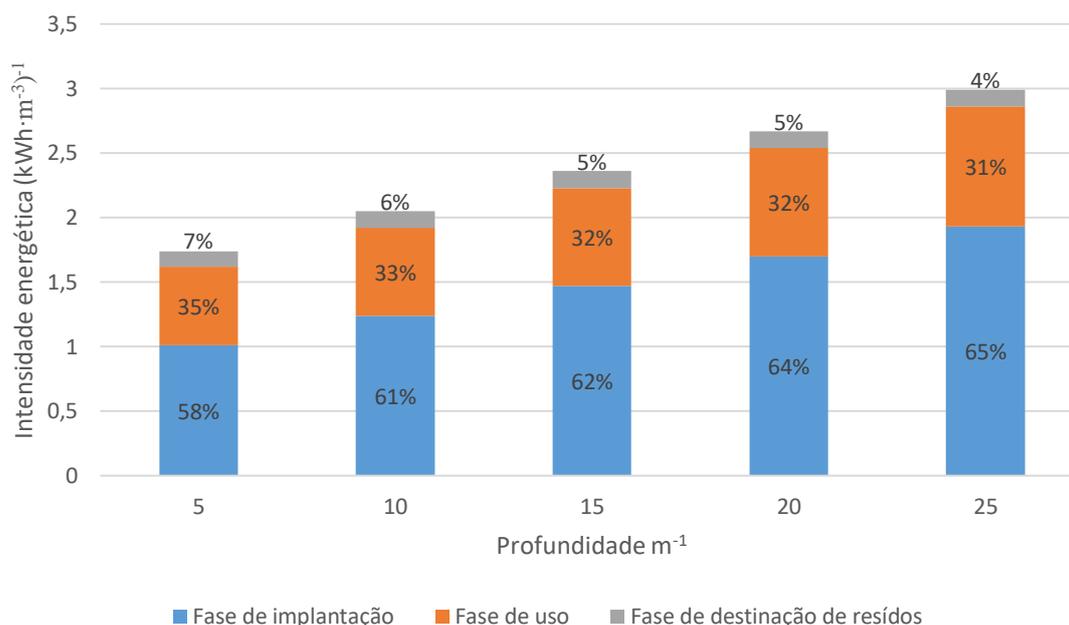
Obviamente, o aumento da profundidade resultou no crescimento da intensidade energética. Isso é atribuído a variação do revestimento, tubulação de sucção e o uso da energia que variam com a profundidade do poço, diferente dos encargos energéticos do concreto, reservatório e bomba que permaneceram constantes durante as análises.

Mo et al. (2011) avaliaram um sistema público de abastecimento de água com manancial subterrâneo, com extração diária de $76,8 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$, a 58 m de profundidade, para o qual encontraram demanda energética total de $2,86 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$. A fase de uso se mostrou mais intensiva com a captação da água a maiores profundidades com participação de 95 %.. Esse valor é superior à intensidade encontrada neste estudo para profundidades até 20 m, o que pode ser associada a maior produção de água, o que contribui para que a energia embutida nos materiais fique diluída.

Para o sistema público de abastecimento de água de Feira de Santana, Guanais, Cohim e Medeiros (2017) encontraram a intensidade energética de $3,51 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$. Mesmo com a limitação imposta na extração da água subterrânea a intensidade energética da água dessa fonte foi inferior à daquela do abastecimento público para todas as condições avaliadas neste estudo, sugerindo a superioridade ambiental do uso descentralizado da água subterrânea.

Na **Figura 4.3** são apresentadas as participações das fases de implantação, operação e disposição final de resíduos sólidos para as situações avaliadas.

Figura 4.3 –Participação das etapas dos sistemas na intensidade energética.



Fonte: autores, 2018.

De acordo com a **Figura 4.3** a fase de implantação do sistema foi a mais intensiva, comparada com a de operação e disposição de resíduos, contrariando a indicação de muitos estudos que utilizaram a metodologia de ACV em sistemas de abastecimento de água que apontam maior participação da fase de uso (GHIMIRE *et al.*, 2014).

A adoção do uso da energia de *feedstock* possibilitou uma redução na intensidade energética dos sistemas avaliados, no qual as maiores recuperações de energia foram observadas nos materiais que utilizaram PEAD seguido do PVC.

A flexibilização do critério adotado de limitar a retirada à capacidade de recarga considerando a área total do lote como bacia de infiltração, em que todo o volume de escoamento gerado fosse retido e recarregasse o aquífero, aumentaria a produção de água, diluindo os encargos energéticos.

Apesar da baixa eficiência da bomba, o consumo de energia (fase de operação) não ser o componente principal da intensidade energética da água produzida, representa mais de 30%, o que sugere a avaliação de uma bomba mais eficiente e construída com materiais menos energo-intensivos. Avaliando um cenário de utilização de uma bomba centrífuga para poço, com maior eficiência em aço ou ferro fundido, teria o dobro da massa da bomba analisada (11,5kg). Em compensação, a intensidade energética do ferro é 20% da do

alumínio e a eficiência do conjunto seria quase o triplo (58%), implicando num ganho energético de quase 8 vezes em relação à bomba vibratória analisada.

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores de intensidade energética para alguns sistemas descentralizados de abastecimento de água.

Tabela 4.5 - Intensidade energética de sistemas descentralizados de abastecimento de água.

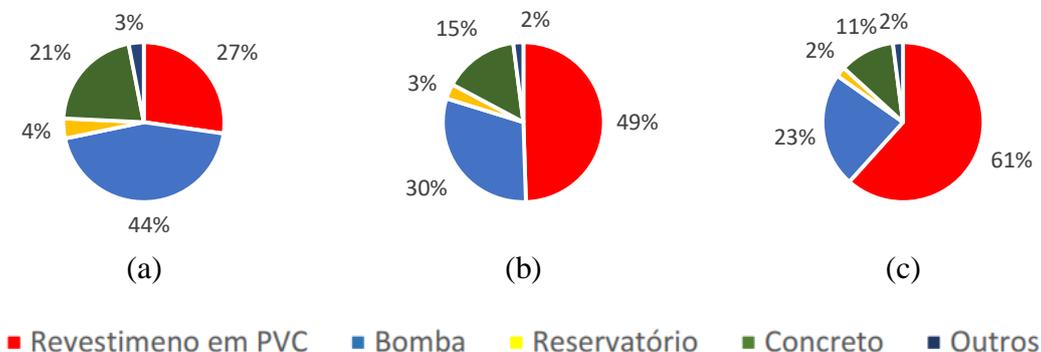
| Autores | Intensidade Energética / (kWh·m⁻³) | Tipo de sistema |
|---|--|--|
| Mithraratne & Vale, 2006 | 0,78 – 1,36 | Aproveitamento de água de chuva |
| Ghimire et al., 2014 | 1,61 | |
| Barbosa, Kiperstok, Cohim (no prelo, 2018) | 0,51 – 0,90 | |
| Marinoski & Ghisi, 2011 | 4,05 | |
| Silva, 2018 | 2,74 | Reúso de água cinza |
| Marinoski & Ghisi, 2011 | 6,27 | |

Fonte: autores, 2018.

Em comparação com alguns sistemas descentralizados, a água subterrânea é menos competitiva que a água de chuva, cujas intensidades energéticas variam de 0,51 kWh·m⁻³ a 1,61 kWh·m⁻³ (MITHRARATNE & VALE, 2006; GHIMIRE *et al.*, 2014; BARBOSA, KIPERSTOK, COHIM; no prelo; BARBOSA, AZEVEDO, COHIM; no prelo), no entanto, valores superiores podem ser encontrados (MARINOSKI & GHISI, 2011), justificados pela não adoção da recuperação energética pelo feedstock na fase final. Os sistemas avaliados de água subterrânea porém apresentam vantagens em relação à água cinza, para a qual estes valores variaram de 2,74 kWh·m⁻³ e 6,27 kWh·m⁻³ (MARINOSKI & GHISI, 2011; SILVA, 2018).

A fase de implantação foi a mais intensiva em energia (**Figura 4.3**) e as contribuições de cada componente dos sistemas são apresentadas na **Figura 4.4**.

Figura 4.4 - Contribuição de cada componente do sistema na intensidade energética da implantação dos sistemas. O item (a), (b) e (c) corresponde as profundidades de 5 m, 15 m e 25 m, respectivamente. O item outros corresponde as tubulações e conexões, com participação inferior a 1% em quase todos os casos.



O revestimento do poço e a bomba juntos foram os componentes que mais participaram da intensidade energética do sistema, responsáveis por 71% na menor profundidade e 84% na maior, com peso crescente para o revestimento na medida em que aumenta a profundidade (Figura 4.4). Tal evidência aponta para os principais itens que precisam ter o desempenho melhorado e para onde devem ser dirigidos os esforços de pesquisa.

4.4 CONCLUSÃO

A captação da água subterrânea em profundidades de 5 m a 25 m em Feira de Santana apresentou intensidade energética com 1,74 kWh·m³ a 2,97 kWh·m³, abaixo, portanto, que a do sistema público de abastecimento, com 3,51 kWh·m³.

Em termos ambientais, a comparação com outras fontes alternativas, indica que a água subterrânea nas profundidades estudadas é menos energeticamente intensiva, que a o tratamento e uso de água cinza, mas é mais energeticamente intensiva que o uso da água de chuva.

A fase de implantação contribui mais para a intensidade energética que a fase de uso e de descarte de resíduos. Os materiais de revestimento e a bomba são os principais responsáveis pelos encargos energéticos nessa fase, somando de 71% na menor profundidade a 84% na maior da intensidade energética total.

Medidas como o uso de bomba mais eficiente e fabricada com material mais leve e menos intensivo energeticamente, poderia ser mais vantajoso em termos globais. Assim como, a

flexibilização do critério de limitação da retirada de água à recarga através da área permeável do lote possibilitaria o aumento da produção de água e a consequente diluição dos encargos energéticos.

Devido a este estudo encontrar maior contribuição da fase de implantação, outros estudos podem ser desenvolvidos para avaliar diferentes componentes para o sistema, possibilitando encontrar materiais menos intensivos que possibilitem as menores intensidades energéticas para o uso da água subterrânea.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5688: Sistemas prediais de água pluvial, esgoto sanitário e ventilação - Tubos e conexões de PVC, tipo DN - Requisitos. Rio de Janeiro, 1999.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISSO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISSO 14044: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2009b.
- ANAUGER. Informações técnicas da bomba vibratória ANAUGER Ecco, 2018. Disponível em: <<https://www.anauger.com.br/bombas-vibratorias/anauger-ecco/>>.
- ANJOS, N.F.R. dos; BASTOS, C.A. de M. Estudo das possibilidades hidrogeológicas de Feira de SantanaBahia. Recife; SUDENE, P. 59, Brasi, 1968.
- BASTOS, Paulo Vitor Souza. Análise do ponto de máxima eficiência de uma bomba vibratória variando a tensão de alimentação. 2015. 76 f. Universidade Federal do Ceará, 2015.
- BARBOSA, T.; AZEVEDO, B.; COHIM, E. Avaliação energética de poços rasos para abastecimento doméstico. No prelo.
- BARBOSA, T. J.; KIPERSTOK, A. C.; COHIM, E. B. Life cycle assessment of rainwater harvesting systems for brazilian semi-arid households. No prelo.
- BROWN, R. R.; KEATH, N.; WONG, T. H F. Urban water management in cities: historical, current and future regimes. *Water Science and Technology*, v. 59, n. 5, p. 847–855, 2009.
- CRETTAZ, P et al. Life cycle assessment of drinking water and rain water for toilets flushing. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, v. 48, n. 3, p. 73–83, 1999.
- MOUJABBER, M. et al. Comparison of different indicators for groundwater contamination by seawater intrusion on the Lebanese coast. *Water Resources Management*, v. 20, n. 2, p. 161–180, 2006.
- ERBAN, Laura E.; GORELICK, Steven M.; ZEBKER, Howard A. Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, v. 9, n. 8, 2014.
- FENG, Le et al. The driving force of water footprint under the rapid urbanization process: a structural decomposition analysis for Zhangye city in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 163, p. S322–S328, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.047>>.
- GUANAIS, Ana Luiza Rezend; COHIM, Eduardo Borges; MEDEIROS, Diego Lima. Avaliação energética de um sistema integrado de abastecimento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 6, p. 1187–1196, 2017.
- GHIMIRE, Santosh R et al. Life Cycle Assessment of Domestic and Agricultural Rainwater Harvesting Systems. *Environmental Science & Technology*, v. 48, p. 4069–4077, 2014.

- GOPINATH, S. et al. Modeling saline water intrusion in Nagapattinam coastal aquifers, Tamilnadu, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 2, n. 1, p. 2, 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s40808-015-0058-6>>.
- HAMICHE, Ait Mimoune; STAMBOULI, Amine Boudghene; FLAZI, Samir. A review of the water-energy nexus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 65, p. 319–331, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.020>>.
- HAMMOND, Geoff; JONES, Craig. *INVENTORY OF CARBON & ENERGY (ICE)*. . Bath: [s.n.], 2008.
- HENRIQUE, Eduardo et al. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA RESIDENCIAL COM CAPTAÇÃO FLUVIAL CONCESSIONÁRIA COMPARADO A CAPTAÇÃO PLUVIAL IN LOCO. n. 75, p. 1–10, [S.d.].
- HUANG, Bijuan; SHU, Longcang; YANG, Y. S. Groundwater Overexploitation Causing Land Subsidence: Hazard Risk Assessment Using Field Observation and Spatial Modelling. *Water Resources Management*, v. 26, n. 14, p. 4225–4239, 2012.
- IBGE (2010) Censo demográfico do Brasil do ano de 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/feira-de-santana/panorama>. Acesso em 20 de Abril de 2018.
- INMET (2018) Dados pluviométricos da cidade de Feira de Santana dentre os anos de janeiro de 1998 até dezembro de 2012. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em 12 de março de 2018.
- LUIZA, Ana et al. Avaliação energética de um sistema integrado de abastecimento de água Energy evaluation of an integrated water supply system. p. 1–10, [S.d.].
- LUNA, Rejane Maria Rodrigues et al. Groundwater overexploitation and soil subsidence monitoring on Recife plain (Brazil). *Natural Hazards*, v. 86, n. 3, p. 1363–1376, 2017.
- MARINOSKI, A K; GHISI, E. Assessment of the environmental impact and investment feasibility analysis of rainwater use in houses. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, v. 148, p. 391–402, 2011.
- MARINOSKI, Ana Kelly et al. Viabilidade ambiental de sistemas alternativos de água utilizando análise de ciclo de vida. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, p. 1963–1971, Juiz de Fora, 2012.
- MCDONALD, Robert I. et al. Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. *Global Environmental Change*, v. 27, n. 1, p. 96–105, 2014.
- MITHRARATNE, Nalanie; VALE, Robert. *Life-Cycle Resource Efficiency of Conventional and Alternative Water Supply Systems*. 2006, Hong Kong: [s.n.], 2006. p. 8.
- MO, Weiwei et al. Embodied energy comparison of surface water and groundwater supply options. *Water Research*, v. 45, n. 17, p. 5577–5586, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.016>>.
- NAIR, Sudeep et al. Water-energy-greenhouse gas nexus of urban water systems: Review of concepts, state-of-art and methods. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 89, p.

1–10, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.05.007>>.

NASSIF, João Marcelino; SANTOS, Erieli Pinto Dos; SANTOS, Rosângela Leal. Modelagem tridimensional do solo a partir de dados de sondagem à percussão na área urbana de Feira de Santana (BA). Belo Horizonte, 2016.

OKADERA, Tomohiro; CHONTANAWAT, Jaruwan; GHEEWALA, Shabbir H. Water footprint for energy production and supply in Thailand. *Energy*, v. 77, p. 49–56, 2014.

SHANG, Haimin et al. An ecology-oriented exploitation mode of groundwater resources in the northern Tianshan Mountains, China. *Journal of Hydrology*, v. 543, p. 386–394, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.012>>.

SHEN, Shui-Long; XU, Ye-Shuang. Numerical evaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 48, n. 9, p. 1378–1392, 2011. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/t11-049>>.

SILVA, Hamilton de Araújo. Avaliação da potencialidade no reúso doméstico da água cinza tratada para fins não potáveis. 2018. 103 f. Universidade Estadual de Feira de Santana, 2018.

TOSTE, Raquel; ROSMAN, Paulo C C; FREITAS, Marcos A V De. Saline Intrusion Response to Sea Level Rise and Its Implications on Water and Coastal Management : A Case Study in Brazil. p. 510–522, 2017.

VIEIRA, A S; GHISI, E. Water – energy nexus in houses in Brazil : comparing rainwater and gray water use with a centralized system. *Water Science & Technology: Water Supply*, v. 16, n. 2, p. 274–283, 2016.

VIEIRA, Camila Leal. Dinâmica de sistemas para a análise da sustentabilidade do uso da água no reservatório de Pedra do Cavalo. 2017. 129 f. Universidade Estadual de Feira de Santana, 2017.

VOINOV, Alexey; CARDWELL, Hal. The Energy-Water Nexus: Why Should We Care? 2009.

ZOU, Jing et al. Effects of anthropogenic groundwater exploitation on land surface processes: A case study of the Haihe river basin, northern China. *Journal of Hydrology*, v. 524, p. 625–641, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.026>>.

5 MINIMIZAÇÃO DA INTENSIDADE ENERGÉTICA NO ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE UMA RESIDÊNCIA NO MUNICÍPIO DE FEIRA DE SANTANA/BA

RESUMO

A intensidade energética de sistemas de abastecimento de água vem sendo estudados devido ao nexo água/energia e à emissão de gases efeito estufa. Este estudo analisa a minimização da intensidade energética no abastecimento de água de uma residência, em Feira de Santana/BA a partir do uso de fontes alternativas de água. Os usos e fontes foram arranjados em um diagrama, relacionando a destinação para cada fonte. Utilizou-se soma dos produtos das respectivas demandas e intensidades energéticas de cada fonte alternativa de água. Os resultados mostraram um potencial de redução de consumo de água do sistema público de até 70%. Face as características qualitativas e quantitativas, a água de chuva e a subterrânea seriam usadas por completo, diferentemente da água cinza que apresentaria excedente. Os meses mais chuvosos possibilitaram os menores consumos de água do sistema urbano e as menores intensidades energéticas, o que é relevante devido a este período coincidir com as menores vazões afluentes ao manancial que abastece o município. A intensidade energética final utilizando todas as fontes de água foi de $2,44 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, redução de 31% dos $3,51 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ do sistema urbano. A redução prevista em emissões de dióxido de carbono seria de aproximadamente 5,0 mil t/a de CO_2eq .

Palavras-chaves: Fontes de alternativas de água, demanda energética, uso racional de água

Abstract

The energy intensity of water supply systems has been studied due to the water/energy nexus and the emission of greenhouse gases. The present study aims to analyze the reduction of energy intensity in the water supply at a household located in Feira de Santana Bahia State, Brazil, based on alternative water sources. End-uses and water supply sources were arranged in a diagram, relating the destination to each source. A minimization algorithm has been developed translating the diagram and including the energy intensity of each source. The results showed a potential reduction of water consumption of the public system till 70%. Taking into account the qualitative and quantitative parameters, the rainwater and the groundwater would be used completely, whereas there could exist a surplus in the greywater supply capacity. The rainy months gave rise to the lower consumption of water from centralized potable water supply systems and the lower energy intensity, which is associated with the period with the lowest inflows of raw water to the municipal water supply system. The combined energy intensity considering all water sources was $2.44 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, which promotes a reduction of 31% from the $3.51 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ of the urban system. The expected reduction in carbon dioxide emissions would be approximately 5,0 thousand t/year CO_2eq .

Key words: Sources of supply, energy demand, rational use of water

5.1 INTRODUÇÃO

Os primeiros centros populacionais e sistemas de abastecimento de água, se desenvolveram onde existiam fontes de água abundantes e confiáveis. Muito antes do conceito de sustentabilidade ser formulado, as comunidades entenderam que só poderiam ser sustentadas enquanto seus usos de água permanecessem dentro dos limites do abastecimento local de água (RICHTER *et al.*, 2018).

Entretanto, o crescimento das cidades levou os gestores das águas urbanas a confrontarem com desafios cada vez mais complexos, em particular quando os recursos existentes e disponíveis atingem os limites da exploração sustentável (BROWN; KEATH; WONG, 2009). O desenvolvimento econômico, aumento populacional e processos de urbanização têm contribuído para o estresse das fontes de água disponíveis, resultando na implantação de sistemas de infraestrutura urbana de água cada vez mais complexos.

A água e energia são recursos inter-relacionados, pois a água, é requisitada na geração energética e a energia é utilizada na disponibilização da água (UNESCO, 2014, LAM; KENWAY; LANT, 2016). Um dos principais problemas ambientais associados aos sistemas de fornecimento de água, é o uso da energia, principalmente eletricidade, que está relacionado a emissão de gases de efeito estufa (VOINOV; CARDWELL, 2009).

A centralização de serviços urbanos de água como o abastecimento e o esgotamento sanitário tem sido bastante comum e, embora visem a proteção da saúde humana, garantindo o suprimento de água confiável e o afastamento e tratamento das excretas, na maioria das vezes deixam de considerar tais impactos associados a emissão de poluentes a atmosfera (SHARMA *et al.*, 2010).

Por outro lado, a população urbana deve aumentar (UN, 2018), assim como as demandas por água, para atender às necessidades da populações e economias em crescimento, exacerbando na mesma proporção as pressões sobre recursos naturais limitados. Ademais, a deterioração das águas próximas aos centros urbanos e o aumento da demanda de água faz com que seja necessário buscar água a distâncias cada vez mais longas, elevando o encargo energético.

Para fazer face à cada vez mais reconhecida complexidade dos problemas, muitos métodos de análise de sistemas têm sido desenvolvidos, a exemplo da Análise de Ciclo

de Vida (ACV) e Análise de Fluxos de Materiais (AFM), crescentemente utilizados no gerenciamento dos recursos hídricos. A metodologia da ACV, estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo da vida útil de um produto (NBR ISO 14040, 2009), sistemas de abastecimento de água por exemplo, enquanto a AFM possibilita a contabilização dos fluxos de massas e energia.

Diversos autores vêm utilizando a ACV para avaliar a intensidade energética dos sistemas centralizados urbanos de abastecimento de água (MO *et al.*, 2011, LEMOS *et al.*, 2013, GUANAIS; COHIM; MEDEIROS, 2017), mostrando a importância do setor na utilização de energia, com valores variando de $2,00 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ a $3,51 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$. Guanais, Cohim e Medeiros (2017) mostraram que a energia incorporada à água utilizada em uma residência em Feira de Santana-BA pode chegar a 30% da eletricidade utilizada no domicílio.

Uma alternativa ao sistema centralizado é a adoção de sistemas descentralizados de fornecimento de água, com a utilização de fontes de água disponíveis próximo aos pontos de consumo. Atender à crescente demanda de água é um problema significativo, mas a sustentabilidade é de igual interesse, as fontes alternativas não devem possibilitar somente o aumento da oferta hídrica, mas também possibilitar a redução de impactos ao meio ambiente.

Nesse sentido, alguns estudos foram realizados para identificar a intensidade energética de sistemas descentralizados de abastecimento de água, a exemplo do aproveitamento da água de chuva (CRETZAZ *et al.*, 1999, GHIMIRE *et al.*, 2014, VIEIRA; GHISI, 2016, BARBOSA; KIPERSTOK; COHIM, no prelo) água cinza (MARINOSKI *et al.*, 2012, SILVA, 2018) e água subterrânea (BARBOSA; AZEVEDO; COHIM, no prelo).

Não se trata de eliminar os sistemas centralizados. Com um legado de soluções de infraestrutura centralizada já implementados, a combinação com o investimento crescente em soluções descentralizadas resulta num processo de hibridização em que a mistura de sistemas centralizados e descentralizados (SAPKOTA *et al.*, 2014), porém com menor impacto ambiental para o atendimento às demandas urbanas de água.

As diversas fontes de abastecimento de água estão associadas a diferentes intensidades energéticas, quantidades e qualidades, assim como os usos demandam diferentes quantidade e qualidades. A metodologia de AFM pode ser aplicada com o objetivo de

identificar a melhor combinação das fontes de água que possibilitem o menor encargo energético para fornecimento de água.

Foram identificados estudos que avaliam a implementação de sistemas híbridos que integram água do sistema público e sistemas descentralizados (SAPKOTA et al., 2014), porém não quantificam os fluxos de água, nem objetivam a redução da intensidade energética.

Este estudo possui o objetivo de avaliar a minimização da intensidade energética no abastecimento de água para uma residência localizada no município de Feira de Santana/BA usando uma combinação das fontes disponíveis.

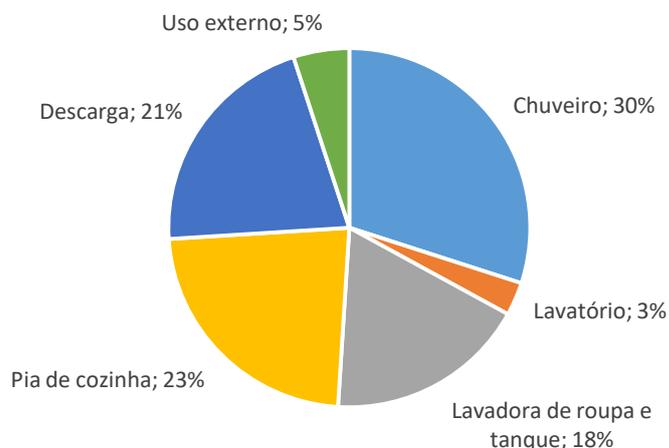
5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

5.2.1 Local de estudo

A taxa de cobertura de abastecimento de água do município de Feira de Santana para o ano de 2016 foi de 96%, enquanto que para o esgotamento sanitário foi 58%. Neste estudo, admitiu-se um lote residencial, com área total de 160 m², com 50% de área permeável, ocupado por domicílio unifamiliar de um pavimento, com ocupação de 4 pessoas na residência.

Este estudo tomou como base os dados de consumo obtidos por Marinoski et al. (2012), em que foram avaliados os consumos finais de água em 20 residências unifamiliares. A participação dos usos de água nos aparelhos hidráulicos no domicílio é apresentada na **Figura 5.1**.

Figura 5.1 – Valores médios de contribuição dos aparelhos hidráulicos no uso da água para a amostra de residências



Fonte: Adaptado, Marinoski et al. (2012)

Para este estudo, foi adotado o consumo de água na residência de $120 \text{ L}\cdot(\text{pessoa}\cdot\text{dia})^{-1}$ e ocupação de 4 pessoas, ou seja, consumo previsto de $480 \text{ L}\cdot\text{dia}^{-1}$. No estudo de Marinoski et al. (2012) não foi contabilizado o uso da água para beber, então foi adotado o consumo de $4 \text{ L}\cdot(\text{pessoa}\cdot\text{dia})^{-1}$. Os valores proporcionais de consumo de água do estudo de Marinoski et al. (2012) foram utilizados e apresentado na **Tabela 5.1** - Consumo previsto por aparelho hidráulico na residência.

Tabela 5.1 - Consumo previsto por aparelho hidráulico na residência.

| Usos | Beber | Chuveiro | Lavatório | Lavagem roupa | Pia de cozinha | Descarga | Uso externo |
|------------------------------------|-------|----------|-----------|---------------|----------------|----------|-------------|
| ($\text{L}\cdot\text{dia}^{-1}$) | 8 | 142 | 14 | 85 | 109 | 99 | 24 |

Fonte: Adaptado, baseado no estudo de Marinoski et al. (2012). Os valores da lavadora de roupa e tanque foram associados a lavagem de roupa.

5.3 FONTES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Foi analisado o uso conjunto de quatro fontes de abastecimento de água, a do sistema público, de chuva, subterrânea e cinza. Os valores de intensidade energética foram retirados de estudos de ACV, realizados para estas fontes na cidade de Feira de Santana, nos quais a unidade funcional adotada foi a produção de 1 m^3 de água. Estes estudos são apresentados na seção a seguir.

5.3.1 Sistema de abastecimento público

Guanais, Cohim e Medeiros (2017) avaliaram a intensidade energética do sistema urbano de abastecimento de água de Feira de Santana, no qual a fronteira do sistema estabelecida foi da etapa de captação até a entrada de água na edificação, excluindo as etapas de uso, coleta e tratamento de efluente sanitário. A produção de água, consumo de energia e produtos químicos foram consideradas, e encontrada intensidade energética de 3,51 kWh·m⁻³, divididos em 1,11 kWh·m⁻³ na captação, 0,85 kWh·m⁻³ no tratamento e 1,55 kWh·m⁻³ para distribuição.

Para este estudo, foi considerado que a disponibilidade de água potável é ilimitada, ou seja, seu fornecimento é constante, desconsiderando possíveis intermitências de abastecimento. Considerando o nível de tratamento com grau de potabilidade, admitiu-se que essa fonte é a única que pode ser utilizado para beber, além de todos os outros usos.

5.3.2 Aproveitamento de água pluvial

Barbosa, Kiperstok e Cohim (no prelo) avaliaram as intensidades energéticas de sistemas de aproveitamento de água pluvial com diferentes áreas de captação e volumes de reservatório, variando de 50 m² a 250 m² e 500 L a 15 000 L, respectivamente. Para fronteira do estudo foram consideradas as fases de implantação, operação e destinação final de resíduos, no qual esta última foi adotada a energia de *feedstock*. Admitiu-se uma área de cobertura de 80 m², valor médio de cobertura para região nordeste do Brasil (GHISI, 2006). Para esta área de cobertura e com o volume de reservatório de 1750 L, a intensidade energética encontrada foi de 0,72 kWh·m⁻³.

Para estimativa de produção de água destes reservatórios, foi utilizado o software Netuno, com dados diários de precipitação, coeficiente de escoamento superficial de 0,80, demanda de água e volumes de reservatório.

5.3.3 Aproveitamento da água subterrânea

Barbosa, Azevedo e Cohim (no prelo) avaliaram a intensidade energética de sistemas de aproveitamento de água subterrânea com diferentes profundidades, variando de 5 m a 25 m. Para fronteira do sistema, também foram consideradas as fases de uso, operação e destinação de resíduos, com a energia de *feedstock*. Como forma de preservação do recurso, foi considerado que a captação da água fosse limitada ao volume de água

infiltrada, com área permeável de 80 m², resultando na produção de 122 L·dia⁻¹. Para este estudo foi considerado a profundidade média de 15 m, para a qual a intensidade energética encontrada foi de 2,35 kWh·m⁻³.

5.3.4 Reúso de água cinza

Foram avaliados diferentes valores de intensidade energética para sistemas de reúso de água cinza, apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores de intensidade energética para água cinza e sistemas de tratamento de efluente.

| Autores | Intensidade Energética / (kWh·m-3) | Tipo de sistema |
|------------------------------------|---|--|
| Silva, 2018 | 2,74 | Reúso de água cinza |
| Sperling; Chernicharo, 2005 | 0,08 | Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente |
| | 0,12 | Sistema centralizado com o uso de filtro aerado |
| Memon et al, 2015 | 2,58 | Aeração e desinfecção |
| | 3,23 | Tanque de equalização e desinfecção |
| | 7,53 | Biorreator de membrana |
| | 4,30 | Filtração e aeração |

Em um estudo de reúso de água cinza realizado no município de Feira de Santana, (SILVA, 2018) encontrou a intensidade energética de 2,74 kWh·m⁻³, para o tratamento em um sistema com Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC), a participação da etapa de implantação foi de 0,23 kWh·m⁻³ e a de operação com 2,51 kWh·m⁻³. Em comparação com sistemas centralizados que utilizam sistema similar para tratamento de efluente sanitário com Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA) e filtro aerado, os valores com a operação são em torno de 0,08 kWh·m⁻³ e 0,12 kWh·m⁻³ (SPERLING; CHERNICHARO, 2005). Em outros sistemas de tratamento de água cinza, os valores encontrados foram de 2,58 kWh·m⁻³ (aeração e desinfecção), 3,23 kWh·m⁻³ (tanque de equalização e desinfecção), 7,53 kWh·m⁻³ (biorreator de membrana) e 4,30 kWh·m⁻³ (filtração e aeração) (MEMON et al, 2015). Em ambos os casos, aos valores relatados foram aplicados fator de conversão de energia brasileira primária para energia entregue ao consumidor de 2,15 kWh/kWh utilizados (WERNET *et al.*, 2016) para efeito de melhor comparabilidade.

Os valores apresentados para sistemas centralizados, considerando apenas a energia de operação, foi mais baixo, possivelmente devido ao grande volume de efluente que é tratado pelo sistema, além de utilizar sistemas mais eficientes de bombeamento. Já o estudo de Silva (2018) quando comparado a outros sistemas de tratamento de água cinza, apresenta valor inferior, que pode ser caracterizado como um sistema energeticamente mais eficiente que os demais. Apesar de Silva (2018) não ter considerado a energia de *feedstock* e energia elétrica necessária para recalque da água a um reservatório superior, a adoção da recuperação energética na disposição final seria inferior que os demais sistemas descentralizados e a energia de recalque teriam participação inferior à da fase de tratamento, considerado a mais intensiva.

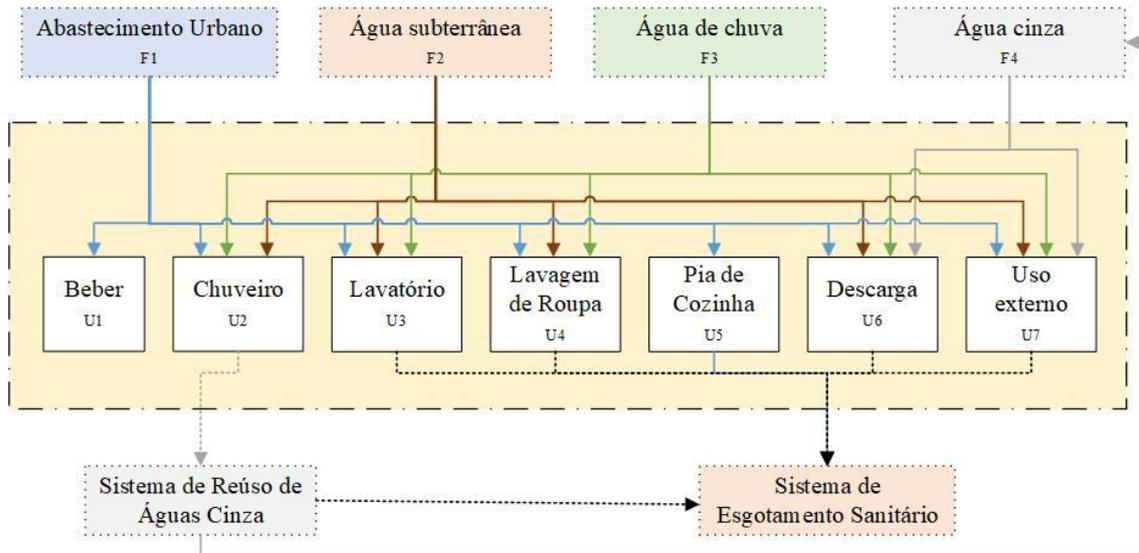
Foi considerada como fonte de água cinza o reaproveitamento da água do chuveiro, estimada em $143 \text{ L}\cdot\text{dia}^{-1}$, devido a este volume atender aos usos propostos de descarga e uso externo.

5.4 DIAGRAMA DE FONTES E USOS

Em uma residência é observado diferentes demandas quantitativas e qualitativas nos aparelhos hidráulicos. Estas demandas devem ser um elemento de consideração e adequação das disponibilidades para atendimento ao consumo. A combinação de fontes e usos pressupõe uma qualidade de cada fonte compatível com o uso associado.

Foi considerado que a água de abastecimento urbano pode atender a todos os usos na residência. Já a água de chuva pode ser utilizada em todos os aparelhos hidráulicos menos o uso para beber. Foi considerado para a água subterrânea os mesmos usos da água chuva, porém, foi imposta a restrição de lavagem de roupa, devido a possibilidade de causar manchas. A água cinza consegue atender aos usos da descarga e externo. O diagrama de fontes e usos mostrado na **Figura 5.2** apresenta as fontes de abastecimento de água associadas aos seus possíveis usos.

Figura 5.2 –Diagrama de fontes e usos.



Fonte: Autores, 2018. Os valores de “F” com os índices que vai de 1 a 4, corresponde as fontes de água disponíveis. Os valores de “U” com os índices variando de 1 a 7, corresponde aos usos de água na residência.

5.5 MINIMIZAÇÃO ENERGÉTICA

Foram avaliadas diferentes fontes de abastecimento no fornecimento de água aos pontos de consumo distintos. As parcelas de consumo de água e os valores de demanda atribuídas a cada fonte, foram utilizadas para encontrar os volumes totais finais de cada uso, modeladas pelas Equações 1 a 7.

$$U_{1\ total} = a_{F1} \cdot U_1 \quad \text{Equação (1)}$$

$$U_{2\ total} = b_{F1} \cdot U_2 + b_{F2} \cdot U_2 + b_{F3} \cdot U_2 \quad \text{Equação (2)}$$

$$U_{3\ total} = c_{F1} \cdot U_3 + c_{F2} \cdot U_3 + c_{F3} \cdot U_3 \quad \text{Equação (3)}$$

$$U_{4\ total} = d_{F1} \cdot U_4 + d_{F2} \cdot U_4 \quad \text{Equação (4)}$$

$$U_{5\ total} = e_{F1} \cdot U_5 \quad \text{Equação (5)}$$

$$U_{6\ total} = f_{F1} \cdot U_6 + f_{F2} \cdot U_6 + f_{F3} \cdot U_6 + f_{F4} \cdot U_6 \quad \text{Equação (6)}$$

$$U_{7\ total} = g_{F1} \cdot U_7 + g_{F2} \cdot U_7 + g_{F3} \cdot U_7 + g_{F4} \cdot U_7 \quad \text{Equação (7)}$$

As variáveis de *a* à *g* correspondem às parcelas de atendimento atribuíveis a cada uso, de beber ao uso externo, enquanto os índices de 1 a 4 dessas variáveis se relacionam às fontes, do abastecimento público a água cinza, relacionados na **Figura 5.2**.

O objetivo do modelo é minimizar a função definida como o produto da fonte de água e a respectiva energia incorporada definida na **Equação 8**.

$$\text{Min } UE = \sum_{i=1}^4 (a_i \cdot U_1 + b_i \cdot U_2 + c_i \cdot U_3 + d_i \cdot U_4 + e_i \cdot U_5 + f_i \cdot U_6 + g_i \cdot U_7) E_i \quad (8)$$

Com i variando de 1 a 4 de acordo com as fontes e E representa o valor da intensidade energética de fonte.

Adicionalmente, foram estabelecidas restrições correspondentes aos volumes máximos de produção de cada fonte e de consumo de cada uso.

$$a_{F2} \cdot U_1 + b_{F2} \cdot U_2 + c_{F2} \cdot U_3 + d_{F2} \cdot U_4 + e_{F2} \cdot U_5 + f_{F2} \cdot U_6 + g_{F2} \cdot U_7 \leq \text{Máx}_{chuva}$$

Equação (9)

$$a_{F3} \cdot U_1 + b_{F3} \cdot U_2 + c_{F3} \cdot U_3 + d_{F3} \cdot U_4 + e_{F3} \cdot U_5 + f_{F3} \cdot U_6 + g_{F3} \cdot U_7 \leq \text{Máx}_{subt}$$

Equação (10)

$$a_{F4} \cdot U_1 + b_{F4} \cdot U_2 + c_{F4} \cdot U_3 + d_{F4} \cdot U_4 + e_{F4} \cdot U_5 + f_{F4} \cdot U_6 + g_{F4} \cdot U_7 \leq \text{Máx}_{cinza}$$

Equação (11)

$$U_{1 \text{ total}} = U_1 \quad \text{Equação (12)}$$

$$U_{2 \text{ total}} = U_2 \quad \text{Equação (13)}$$

$$U_{3 \text{ total}} = U_3 \quad \text{Equação (14)}$$

$$U_{4 \text{ total}} = U_4 \quad \text{Equação (15)}$$

$$U_{5 \text{ total}} = U_5 \quad \text{Equação (16)}$$

$$U_{6 \text{ total}} = U_6 \quad \text{Equação (17)}$$

$$U_{7 \text{ total}} = U_7 \quad \text{Equação (18)}$$

As variáveis de a a g correspondem aos usos, de beber ao uso externo, e os índices de 1 a 4 são as fontes, do abastecimento público a água cinza, relacionados na **Figura 5.2**. U corresponde ao volume de água utilizado por cada aparelho e U_{total} corresponde ao volume total para cada uso e os índices de 1 a 7 indicam os usos diversos.

5.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores correspondentes às parcelas de cada fonte utilizada nos usos da residência hipotética, obtidos após a minimização, solução do problema descritos pelas equações 1 a 19, são apresentados na **Tabela 5.2**.

Tabela 5.2 – Contribuição das fontes de abastecimento para os usos da residência.

| Usos | Sistema urbano / (L·dia ⁻¹) | Água de chuva / (L·dia ⁻¹) | Água Subterrânea / (L·dia ⁻¹) | Água Cinza / (L·dia ⁻¹) | Quantidade total / (L·dia ⁻¹) |
|--------------------------------|---|--|---|-------------------------------------|---|
| Beber | 8 | 0 | 0 | 0 | 8 |
| Chuveiro | 17 | 7 | 118 | 0 | 142 |
| Lavatório | 0 | 11 | 4 | 0 | 14 |
| Lavagem de roupa | 0 | 85 | 0 | 0 | 85 |
| Pia de cozinha | 109 | 0 | 0 | 0 | 109 |
| Descarga | 0 | 0 | 0 | 99 | 99 |
| Uso externo | 0 | 0 | 0 | 24 | 24 |
| Total / (L·dia ⁻¹) | 133 | 102 | 122 | 123 | 480 |

Fonte: Autores, 2018

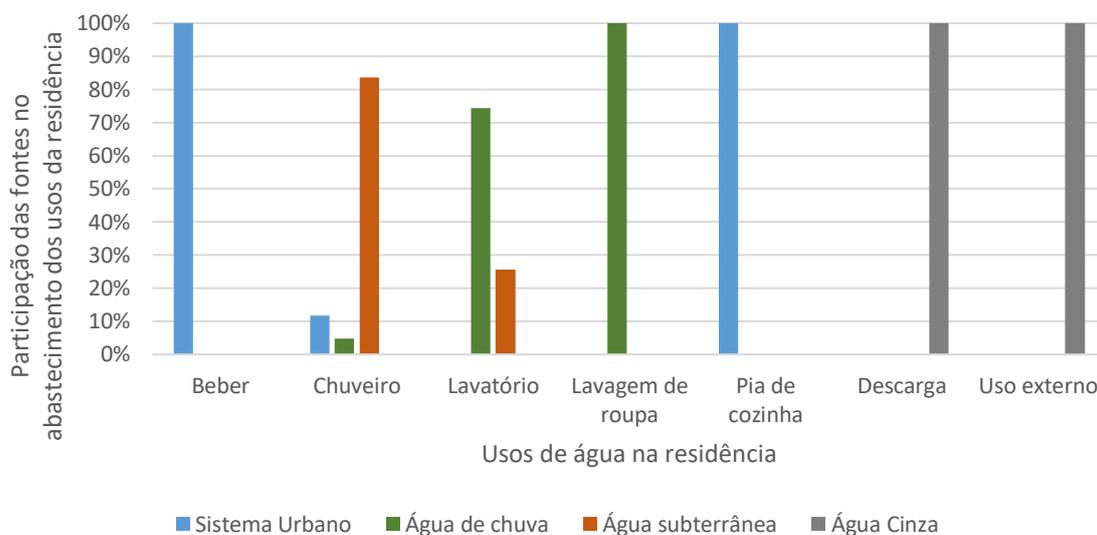
Estabeleceu-se um critério segundo o qual o uso menos exigente em termos de qualidade utilizaria fontes alternativas com menor intensidade energética que a do sistema urbano de abastecimento, e que esta somente seria utilizada em usos restritivos, como para beber, ou quando as fontes alternativas não conseguissem atender quantitativamente a demanda requerida pelo uso.

Todo o volume produzido pelos sistemas de aproveitamento de água pluvial e subterrânea integralmente utilizado face a intensidade energética inferior e a possibilidade dessas fontes atenderem qualitativamente a quase todos os usos. Deve-se ressaltar que as limitações impostas a ambos os sistemas de aproveitamento limitaram a substituição da água do sistema público por água de chuva e subterrânea a apenas 21% e 25%, respectivamente.

A produção de água cinza atendeu a 26% da demanda de água na residência, mesmo desconsiderando a captação das águas servidas de lavatório, lavagem de roupa e pia de cozinha. Diferentemente do que ocorreu com as outras fontes descentralizadas, o atendimento a demanda aos usos selecionados, descarga e uso externo, foi de 100%, devido a sua demanda ser inferior à sua produção, causando excedente do volume produzido. O que limitou seu maior uso foi a própria demanda de água para a respectiva fonte.

Na **Figura 5.3** são apresentadas as participações das fontes de água no atendimento aos usos da residência.

Figura 5.3 - Participação das fontes de abastecimento nos usos da residência.



Fonte: Próprio autor, 2018

O aproveitamento conjunto dessas fontes possibilitaria uma redução de 72% do consumo de água potável vinda do sistema de urbano de abastecimento de água.

Nessas condições, a demanda de energia minimizada seria de 1,16 kWh/dia, ou seja, intensidade final média de 2,42 kWh·m⁻³, o que representaria 31% de redução em comparação com o abastecimento exclusivo a partir do sistema urbano. Considerando-se o volume micromedido para o SIAA de Feira de Santana, 20,3 milhões de metros cúbicos em 2016 (EMBASA, 2017), essa redução representaria uma economia de 22 milhões de kWh/ano, suficiente para atender 15,1 mil residências na cidade, cujo consumo médio é de 1.442 kWh por residência por ano (BAHIA, 2018). Ou, de outra forma, a redução de energia decorrente do uso de fontes alternativas representaria uma redução de 5,0 mil tCO₂eq por ano se se considera uma emissão de 0,229 kg CO₂eq por kWh gerado (WERNET *et al.*, 2016).

O modelo de minimização foi elaborado com o uso de valores de fornecimento médio fixo das fontes selecionadas. Porém, esses consumos variam mensalmente devido à disponibilidade, principalmente da água de chuva que varia com a precipitação de cada mês do ano. A água subterrânea apresentou valores constantes, devido a sua captação levar em consideração a precipitação média anual. Já a produção de água cinza varia conforme o consumo de água na residência, neste caso o chuveiro, porém, neste estudo

não foi considerado a variação do consumo na residência durante o ano, apenas a demanda média diária.

Foi estimando o comportamento o sistema proposto para os diferentes meses do ano, variando a produção de água de chuva, conforme precipitação disponível. O consumo por fonte após minimização pode ser observado na **Tabela 5.3**.

Tabela 5.3 – Volumes ótimos utilizados de cada fonte em uma residência.

| Mês | Sistema urbano / (L·dia ⁻¹) | Água de chuva / (L·dia ⁻¹) | Água Subterrânea / (L·dia ⁻¹) | Água Cinza / (L·dia ⁻¹) |
|-----------|---|--|---|-------------------------------------|
| Janeiro | 139 | 97 | 122 | 123 |
| Fevereiro | 143 | 92 | 122 | 123 |
| Março | 163 | 72 | 122 | 123 |
| Abril | 129 | 107 | 122 | 123 |
| Mai | 117 | 155 | 122 | 87 |
| Junho | 117 | 178 | 122 | 63 |
| Julho | 117 | 127 | 122 | 115 |
| Agosto | 126 | 109 | 122 | 123 |
| Setembro | 160 | 76 | 122 | 123 |
| Outubro | 177 | 59 | 122 | 123 |
| Novembro | 144 | 92 | 122 | 123 |
| Dezembro | 171 | 64 | 122 | 123 |

Fonte: Autores, 2018

Nota-se, assim como observado na **Tabela 5.2**, que o consumo de água cinza foi priorizado para as demandas de descarga e uso externo, já que esta é uma fonte que possui qualidade inferior às demais disponíveis. Os meses mais chuvosos, maio a julho, possibilitaram a maior redução do consumo de água do sistema urbano, por disponibilizar maior volume de água de chuva, com intensidade energética inferior. O mês de menor precipitação, outubro, ofereceu o maior consumo de água do sistema público, com 37% de participação, diferentemente do de maior precipitação, junho, com 24% de contribuição. Tal fato é da maior relevância se se considera que nesses meses ocorrem as menores vazões médias mensais afluentes do Reservatório de Pedra do Cavalo (GENZ, 2006).

Como observado, o consumo de água potável vinda do Sistema de Abastecimento Público de Água foi reduzido, conseqüentemente, já que são recursos inter-relacionados, a intensidade energética quando comparada ao uso somente da água de abastecimento também foi reduzida, as reduções também variam mensalmente.

5.7 CONCLUSÃO

O estudo propôs um método de minimização da intensidade energética na água de abastecimento de uma residência. Este método pode ser utilizado para outras cidades, e com outras fontes de água, bastando somente acrescentar os valores quantitativos de energia e água.

O potencial de redução do consumo de água do sistema público foi em torno de 72%. Foi consumido todo o volume produzido pelos sistemas de aproveitamento de água pluvial e subterrânea, devido a estas fontes atenderem qualitativamente a quase todos os usos e possuírem as menores intensidades energéticas. Diferentemente do que ocorreu com a água cinza, que apesar de atender em 100% a demanda dos usos de descarga e externo, houve excedente na sua produção.

A maior redução do consumo de água do sistema urbana foi nos períodos de maior precipitação, maio a julho, por justamente o sistema de aproveitamento pluvial possibilitar menor encargo energético que o sistema urbano. Isso se torna mais relevante devido ao fato que este período é o que tem as menores contribuições para o manancial de Pedra do Cavalo que abastece Feira de Santana.

A intensidade energética média seria de $2,42 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, o que representa 31% de redução da intensidade energética, em comparação com o abastecimento só com o sistema urbano de $3,51 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$. Esta redução possibilitaria a redução de emissão de gás carbônico de 5,0 mil tCO₂eq por ano.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISSO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- BAHIA, Secretaria de Infraestrutura (SEI). Dados de consumo de energia elétrica do município de Feira de Santana para o ano de 2016. Coordenação de Desenvolvimento Energético. Disponível em: <<http://www.sei.ba.gov.br/>>. Acesso em maio de 2018.
- BAHIA, Scretaria de Infraestrutura (SEI). **Tipologia climática köppen**. Salvador, 2014. Disponível em: <http://www.sei.ba.gov.br/site/geoambientais/mapas/pdf/tipologia_climatica_segundo_koppen_2014.pdf> Acesso em abril de 2018.
- BARBOSA, T.; AZEVEDO, B.; COHIM, E. Avaliação energética de poços rasos para abastecimento doméstico. No prelo.
- BARBOSA, T. J.; KIPERSTOK, A. C.; COHIM, E. B. Life cycle assessment of rainwater harvesting systems for brazilian semi-arid households. No prelo.
- BROWN, R. R.; KEATH, N.; WONG, T. H F. Urban water management in cities: historical, current and future regimes. *Water Science and Technology*, v. 59, n. 5, p. 847–855, 2009.
- CRETTAZ, P *et al.* Life cycle assessment of drinking water and rain water for toilets flushing. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, v. 48, n. 3, p. 73–83, 1999.
- EMBASA, Empresa Baiana de Águas e Saneamento. Dados do Controle Operacional. Controle Operacional de Água e Esgoto (COPAE) do ano de 2016. Feira de Santana, 2018.
- GENZ, Fernando. SOBRE A CIRCULAÇÃO ESTUARINA DO RIO PARAGUAÇU E BAÍA DE IGUAPE IGUAPE. 2006.
- GHIMIRE, Santosh R *et al.* Life Cycle Assessment of Domestic and Agricultural Rainwater Harvesting Systems. *Environmental Science & Technology*, v. 48, p. 4069–4077, 2014.
- GUANAIS, Ana Luiza Rezend; COHIM, Eduardo Borges; MEDEIROS, Diego Lima. Avaliação energética de um sistema integrado de abastecimento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 6, p. 1187–1196, 2017.
- GHISI, Eneidir. Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. *Building and Environment*, v. 41, p. 1544–1550, 2006.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico 2010**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/feira-de-santana/pesquisa/23/24304?detalhes=true>. Acesso em abril de 2018.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama do município de Feira de Santana**. Disponível em: <[h https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/feira-de-santana/panorama](https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/feira-de-santana/panorama)>. Acesso em abril de 2018.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Dados de precipitação para cidade de Feira de Santana. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/feira-desantana/pesquisa/23/24304?detalhes=true>. Acesso em abril de 2018.

LAM, Ka Leung; KENWAY, Steven J; LANT, Paul A. Energy use for water provision in cities. *Journal of Cleaner Production*, p. 1–11, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.056>>.

LEMOS, Diogo *et al.* Environmental assessment of an urban water system. *Journal of Cleaner Production*, v. 54, p. 157–165, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.029>>.

MARINOSKI, Ana Kelly *et al.* Viabilidade ambiental de sistemas alternativos de água utilizando análise de ciclo de vida. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, p. 1963–1971, Juiz de Fora, 2012.

MEMON, F. A.; FIDAR, A. M.; WARD, S.; BUTLER, D.; ALSHARIF, K. Alternative Water Supply Systems. Chapter 13: Energy and carbon implications of water saving microcomponents and greywater reuse systems. International Water Association (IWA). p. 265–285, 2015.

MO, Weiwei *et al.* Embodied energy comparison of surface water and groundwater supply options. *Water Research*, v. 45, n. 17, p. 5577–5586, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.016>>.

RICHTER, BRIAN D. *et al.* Assessing the Sustainability of Urban Water Supply Systems. *Journal AWWA*, v. 2, n. February, p. 40–47, 2018. Disponível em: <onlinelibrary.wiley.com>.

SAPKOTA, Mukta *et al.* An Overview of Hybrid Water Supply Systems in the Context of Urban Water Management: Challenges and Opportunities. *Water*, v. 7, n. 1, p. 153–174, 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2073-4441/7/1/153/>>.

SHARMA, Ashok *et al.* Role of decentralised systems in the transition of urban water systems. *Water Science & Technology: Water Supply*, v. 10.4, p. 577–583, 2010.

SILVA, Hamilton de Araújo. *Avaliação da potencialidade no reúso doméstico da água cinza tratada para fins não potáveis*. 2018. 103 f. Universidade Estadual de Feira de Santana, 2018.

SPERLING, Marcos Von; LEMOS CHERNICHARO, Carl Augusto De. Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. *IWA Publishing*, p. 1–856, 2005. Disponível em: <<http://choicereviews.org/review/10.5860/CHOICE.45-2633>>.

UN (UNESCO). *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy*. . Paris: [s.n.], 2014.

UNITED NATIONS. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Key Facts*. . [S.l: s.n.], 2018. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wup/publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf>>.

VIEIRA, A S; GHISI, E. Water – energy nexus in houses in Brazil : comparing rainwater and gray water use with a centralized system. *Water Science & Technology: Water Supply*, v. 16, n. 2, p. 274–283, 2016.

VOINOV, Alexey; CARDWELL, Hal. The Energy-Water Nexus: Why Should We Care? *Journal of Contemporary Water Reserch & Education*, v. 143, p. 17–29, 2009.

WERNET, G., BAUER, C., STEUBING, B., REINHARD, J., MORENO-RUIZ, E., AND WEIDEMA, B., 2016. Theecoinvent database version 3 (part I): overview and

methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21(9), pp.1218–1230. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>>.

6 CONCLUSÃO GERAL

Neste estudo foram avaliadas a Intensidade Energética (IE) de fontes descentralizadas de abastecimento. No primeiro artigo foi verificado a IE de Sistemas de Aproveitamento de Água de Chuva (SAAC) e foi observado a existência de um ponto ótimo energético de fornecimento de água para cada área de captação, entorno dos reservatórios de 1.500 L a 2.500 L. A bomba e reservatório foram os mais intensivos, representando cerca de 70% do consumo de energia pública do município. Os resultados da IE ficaram de $0,51 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ a $0,90 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, para área de captação com 80 m^2 a IE obtida foi de $0,72 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, inferior à do sistema público de abastecimento.

Foi observado no primeiro artigo que a participação da fase de implantação foi a etapa mais intensiva. Para explorar este resultado foi elaborado o segundo artigo, no qual avaliou os componentes dos SAAC, utilizando diferentes materiais na construção dos sistemas, como a calha, reservatório e fontes de energia. Foi encontrada grande contribuição da fase de implantação, sendo o reservatório e o item mais intensivo. O melhor cenário avaliado foi o sistema que utilizava reservatório de polietileno, calha de alumínio e fonte de energia fotovoltaica, com intensidade de $0,66 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, e o cenário mais intensivo foi o que utilizava reservatório de concreto, calha de PVC e energia elétrica brasileira, com intensidade de $1,73 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$.

O terceiro artigo de avaliação da IE do aproveitamento da água subterrânea, a contribuição da etapa de implantação também foi a mais intensiva, com participação superior a 70% do revestimento do poço e bomba. Contudo, inferior se comparada com os sistemas de aproveitamento de água de chuva. A maior demanda de energia na fase de uso, é resultante do aumento da energia necessária para adução da água. Os valores encontrados para as profundidades de 5 m a 15 m variaram de $1,74 \text{ kWh}\cdot\text{m}^3$ a $2,97 \text{ kWh}\cdot\text{m}^3$, sendo inferior a do sistema público mas superior se comparado as intensidades encontradas nos SAAC. A flexibilização do critério adotado para retirada da água, possibilitaria a redução do encargo energético.

Os valores encontrados para os sistemas descentralizados de água de chuva e subterrânea foi utilizado no quarto artigo, sendo complementado com valores de IE da água cinza encontrada em literatura. O melhor arranjo energético com as fontes de água do sistema público, água de chuva, subterrânea e cinza para abastecer uma residência com

quatro pessoas no município de Feira de Santana/BA, resultou na IE de 2,44 kWh·m⁻³. Esse valor representaria uma redução de 31% da IE em relação ao sistema público e redução de 70% do consumo da água do sistema público. Os volumes produzidos de água de chuva e subterrânea foram consumidos completamente, devido a sua qualidade atender quase por completo os usos na residência e por possibilitar o menor encargo energético. Houve excedente na produção da água cinza, apesar de atender por completo aos usos a que foi destinada. A maior redução da IE foi identificada nos meses mais chuvosos, com maior produção de água de chuva. Isto se torna relevante devido a este período ser os meses de menores vazões no reservatório que abastece o município.

Em trabalhos futuros poderá ser avaliado o comportamento do uso de múltiplas fontes de abastecimento de água considerando a variação do consumo na residência, como também avaliar o seu comportamento em regiões com diferentes características climáticas e SSA com diferentes intensidades energéticas.