



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

RILTON GONÇALO BONFIM PRIMO

ECONOMIA E ECO-EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE
AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA CONJUNTOS
VERTICAIS NA ZONA INTERTROPICAL:

REVISÃO DA LITERATURA DE EXPERIMENTOS E
ESTIMAÇÕES PARA O NORDESTE DO BRASIL



SALVADOR
2018

RILTON GONÇALO BONFIM PRIMO

**ECONOMIA E ECO-EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE
AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA CONJUNTOS VERTICAIS
NA ZONA INTERTROPICAL:
REVISÃO DA LITERATURA DE EXPERIMENTOS E ESTIMAÇÕES
PARA O NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial de conclusão do Mestrado Acadêmico em Engenharia Industrial - Desenvolvimento Sustentável de Processos e Produtos.

Orientador 1: Prof. Dr. Ricardo de Araújo Kalid.

Orientador 2: Prof. Dr. Marcelo de Santana Silva.

**Salvador
2018**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA), com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Gonçalo Bonfim Primo, Rilton
Economia e Eco-Eficiência de Sistemas de Aquecimento de
Água para Conjuntos Verticais na Zona Intertropical: Revisão
da literatura de experimentos e estimações para o Nordeste do
Brasil / Rilton Gonçalo Bonfim Primo. -- Salvador, 2018.
156 f. : il

Orientador: Ricardo de Araújo Kalid.
Coorientador: Marcelo de Santana Silva.
Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Industrial (Mestrado Acadêmico)) -- Universidade
Federal da Bahia, Escola Politécnica da Universidade Federal da
Bahia, 2018.

1. Tecnologias Limpas. 2. Economicidade. 3. Ecoeficiência.
4. Avaliação de Incerteza. 5. Sistemas de Aquecimento Solares e
Bombas de Calor. I. de Araújo Kalid, Ricardo. II. de Santana
Silva, Marcelo. III. Título.

**ECONOMIA E ECO-EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA
PARA CONJUNTOS VERTICAIS NA ZONA INTERTROPICAL:**

**REVISÃO DA LITERATURA DE EXPERIMENTOS E ESTIMAÇÕES
PARA O NORDESTE DO BRASIL**


RILTON GONÇALO BONFIM PRIMO

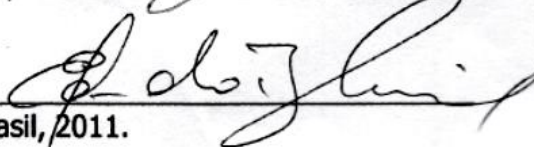
Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof. Dr. Ricardo de Araújo Kalid 
Doutor em Engenharia Química pela Universidade de São Paulo (USP). Brasil, 1999.

Prof. Dr. Marcelo Santana Silva 
Pós-Doutor em Engenharia Industrial (UFBA). Brasil, 2017.

Prof. Dr. Luciano Matos Queiroz 
Doutorado em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Brasil, 2009.

Prof. Dr. Eduardo Henrique Borges Cohim Silva 
Doutor em Energia e Meio Ambiente (UFBA). Brasil, 2011.

Salvador, BA - BRASIL
abril/2018

À patronesse

Profa. Vanda Macedo Bonfim

AGRADECIMENTOS

À Rede de Tecnologias Limpas – TECLIM-UFBA, pelas finezas, na pessoa de Suzete Menezes.
À secretaria do PEI-UFBA, na pessoa de Tatiane Woytisyak, pelo desvelo e brilho profissional.

Ao professor Asher Kiperstok, por cultivar a dissensão, o instinto da “radicalidade necessária”.
Ao Laboratório de Energia (LEN), na pessoa do Prof. Ednildo Torres e Vera Araújo, pelo dom.

À professora Karla Esquerre pelo exemplo e coordenações científicas no GAMMA e RIDECA.
Aos Prof. Diego Lima Medeiros e Dr. Yuri Guerrieri Pereira, pelos diálogos *across the border*.

Aos colegas de lições na ciência e na vida, nas pessoas de Ivone Cerqueira e Daniel Kouloukoui.

Ao Prof. Salvador Ávila, pelo compartilhamento de saberes, livros, projetos e espaços criativos.
Aos confrades coautores de estudos Euclides Bittencourt, Fábio Fernandez, Ângela Silva, João Batista, Javier Pérez, Pieter de Jong, David Santos, Felipe Cunha, José Santos, José Rodríguez.

Às professoras Marcia Heinne e Daiane Silva pelas leituras e revisões atenciosas da dissertação.

Ao orientador Marcelo Silva, pela confiança, estímulo e reta orientação nos instantes de desafio.

Ao orientador Ricardo Kalid, pelo arrojo, diligência intelectual de refluir de si a nós mesmos quanto ousemos ser, e tão desta cortesia quão nos é requerido pela incerteza do valor verdadeiro.

É fácil criticar corretamente; e difícil executar mediocrementemente.

Denis Diderot
1713 - 1784

PRIMO, Rilton Gonçalo Bonfim. **Economia e Eco-Eficiência de Sistemas de Aquecimento de Água para Conjuntos Verticais na Zona Intertropical**: Revisão da literatura de experimentos e estimações para o Nordeste do Brasil. 156 f. il. 2018. Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PEI), Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, 2018.

RESUMO

As tecnologias de aquecimento de água capazes de substituir o chuveiro elétrico (ChE), com ganhos de eficiência física e econômica, constituem soluções recomendadas por organismos mundiais. São rotas procuradas por economias como a Austrália, os EUA, a China e o Brasil, particularmente as que usam a energia solar em regime de termossifão e híbridas. A presente pesquisa voltou-se à revisão da literatura relativa aos experimentos de eficiência hídrica e energética de seis sistemas de aquecimento de água, com estimações para conjuntos verticais na zona intertropical. A literatura é voltada, fundamentalmente, às viabilidades térmica, econômica e de materiais dos sistemas, mas incipiente quanto às ecoeficiências. A revisão objetivou identificar as principais tendências e envolveu 107 artigos, livros e capítulos de livros, 28 dissertações, 06 teses, 04 normas e um relatório federal, pelo Portal de Periódicos da Capes, desde 2000. Cinco tendências foram identificadas: 1) comercial, voltada à construção civil, hotéis e resorts; 2) residencial, voltada a sistemas prediais; 3) social, voltada a condomínios de interesse social, vilarejos populares e rurais; 4) econômica, centrada nas restrições orçamentárias; 5) computacional, voltada a otimização, softwares, controle e incertezas. Foi desenvolvida metodologia de cálculo dos custos contábeis e de oportunidade dos sistemas, eficiências hídrica e energética, quando inseridos no macrossistema ecológico, considerando as emissões de CO₂ equivalente face à configuração da matriz energética local, em quatro cenários: com e sem desperdício hídrico, com e sem efeito estufa. Um Índice de Economicidade-Ecoeficiência (EEI) foi criado para hierarquizar os sistemas. Em ordem decrescente, em cenário sem desperdícios hídricos e considerando o efeito estufa, na Bahia: 1º) Sistemas de Aquecimento Solares (SAS) de baixo custo com placa de Policloreto de Vinilo e de Polipropileno, EEI \cong 50%, distinguindo-se o de PVC por ter uma maior eficiência energética e provocar menor efeito estufa; 2º) SAS Convencionais, EEI \cong 36%; 3º) Bomba de Calor, EEI \cong 24%; 4º) Bomba de Calor flex, EEI \cong 15%. Ampliando o alcance das inferências, as variáveis de entrada receberam tratamentos probabilísticos e avaliação de incertezas, propagadas aos custos totais acumulados, unitários e EEI. Pelo princípio da entropia máxima, distribuições distintas dos *inputs* geraram *outputs* estocásticos com 1e+6 Simulações de Monte Carlo (SMC), com recurso à programação em R e com o software Oracle® Crystal Ball, cujas médias e medianas mostraram-se iguais ou menores que os resultados determinísticos, dada a probabilidade de serem menores ou iguais o número de pessoas, banhos/dia, comprimento da tubulação. A hierarquia foi a mesma. O ChE obteve EEI nulo, tendo a menor eficiência energética. A aquisição e a manutenção do ChE são baratas, mas ele opera de forma mais custosa pelo uso da eletricidade e, por isto mesmo, é mais deletério ambientalmente. Os SAS mostraram-se mais adequados no Nordeste do Brasil, com baixo consumo de energia auxiliar, minimizando emissões de CO₂ a montante. O potencial ecológico e macroeconômico dos SAS de baixo custo é singular em toda região intertropical. A bomba de calor é eficaz e requer escala para ser acessível.

Palavras-Chave: Sistemas de Aquecimento de Água. Economicidade. Ecoeficiência. Macrossistema Ecológico. Incerteza.

PRIMO, Rilton Gonçalo Bonfim. **Economics and Eco-Efficiency of Water Heating Systems for Vertical Set in the Intertropical Zone**: Review of the literature of experiments and estimates for Northeastern Brazil. 156 p. il. 2018. Dissertation (Master's Degree) - Post-Graduation Program in Industrial Engineering (PEI), Federal University of Bahia (UFBA), Salvador, 2018.

ABSTRACT

The water heating technologies capable of replacing the electric shower (ChE), with gains of physical and economic efficiency, are solutions recommended by organisms worldwide. These are routes sought by economies such as Australia, the US, China and Brazil, particularly those using thermosyphon and hybrid solar power. The present research turned to the review of the literature on the experiments of water and energy efficiency of six water heating systems, with estimates for vertical sets in the intertropical zone. The literature is focused, fundamentally, on the thermal, economic and material viability of the systems, but incipient regarding ecoefficiencies. The review aimed to identify the main trends and involved 107 articles, books and book chapters, 28 dissertations, 06 theses, 04 standards and a federal report, from the Portal of Journals of Capes since 2000. Five trends were identified: 1) commercial, focused on construction, hotels and resorts; 2) residential, oriented to building systems; 3) social, aimed at condominiums of social interest, popular and rural villages; 4) economic, centered on budgetary constraints; 5) computational, focused on optimization, software, control and uncertainties. A methodology was developed to calculate the accounting and opportunity costs of the systems, water and energy efficiencies, when inserted in the ecological macrosystem, considering CO₂ emissions equivalent to the local energy matrix configuration, in four scenarios: with and without water waste, with and without greenhouse effect. An Economics-Eco-Efficiency Index (EIS) was created to hierarchize systems. In descending order, in a scenario without water waste and considering the greenhouse effect, in Bahia: 1°) Low-cost solar heating systems (SAS) with polyvinyl chloride and polypropylene board, EEI \cong 50%, distinguishing itself from PVC for having a greater energy efficiency and to cause less greenhouse effect; 2nd) Conventional SAS, EEI \cong 36%; 3°) Heat Pump, EEI \cong 24%; 4) Flex Heat Pump, EEI \cong 15%. Extending the scope of the inferences, the input variables received probabilistic treatments and uncertainty evaluation, propagated to the total accumulated costs, unit and IEE. By the principle of maximum entropy, different distributions of the inputs generated stochastic outputs with 1e + 6 Monte Carlo Simulations (SMC), using R programming and Oracle® Crystal Ball software, whose averages and medians were equal or smaller than the deterministic results or equal, given the probability of being smaller than the number of people, baths / day, pipe length. The hierarchy has not changed. ChE obtained zero EEI, having the lowest energy efficiency. Acquisition and maintenance of ChE are cheap, but it operates more cost-effectively through the use of electricity and, for this reason, is more deleterious in the environment. The SAS were more adequate in the Northeast of Brazil, with low auxiliary energy consumption, minimizing upstream CO₂ emissions. The ecological and macroeconomic potential of low-cost SAS is unique in every intertropical region. The heat pump is effective and requires scale to be accessible.

Keywords: Water Heating Systems. Economicity. Eco-efficiency. Ecological Macrosystem. Uncertainty.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais estudos realizados em sistemas SHPS	36
Figura 2 – SAS-C individuais para conjuntos verticais	42
Figura 3 - SAS-C coletivo em hotel (Salvador-Ba)	42
Figura 4 - Esquema genérico dos SHPS ar-água.....	46
Figura 5 - SAS predial com Gás GLP	48
Figura 6 - Irradiação Solar na Bahia - Média Anual	53
Figura 7 - Faixas de classificação para Coletor Solar e Sistemas Acoplados – aplicação banho (Anexo 3).....	54
Figura 8 - Superfície gerada por uma malha de pontos da função custo anual (f).....	57
Figura 9 - Experimento na UFU com Sistemas de ASBC*	59
Figura 10 - Rutas tecnológicas ecoeficientes de calentamiento de agua para baño disponibles en Brasil y en el exterior.....	99
Figura 11 - Construcción del SCS da bajo costo.....	100
Figura 12 - Modo de funcionamiento de una bomba de calor.....	102
Figura 13 - Modo de funcionamiento de una bomba de calor reversible.....	103
Figura 14 - Vía de descarbonización coherente con el Acuerdo de París ^[29]	108
Figura 15 - Distribuição triangular para a variável de entrada quantidade de pessoas	140
Figura 16 - Distribuição normal da variável de entrada custo de manutenção do ASHP	140
Figura 17 - Distribuição uniforme da variável de entrada comprimento da tubulação para o ASBC de PVC	141
Figura 18 - Distribuição do custo do banho do chuveiro elétrico no cenário 2 considerando o efeito estufa a montante	141
Figura 19 - Distribuição do custo do banho do SAS Convencional no cenário 2 (sem desperdícios) considerando o efeito estufa a montante	142
Figura 20 - Distribuição do custo do banho do ASBC de PVC no cenário 2 (sem desperdícios) considerando o efeito estufa a montante.....	142
Figura 21 - Distribuição do custo do banho do ASBC de PP no cenário 2 (sem desperdícios) considerando o efeito estufa a montante.....	143

Figura 22 - Distribuição do custo do banho da SHPS no cenário 2 (sem desperdícios) considerando o efeito estufa a montante..... 143

Figura 23 - Distribuição do custo do banho do ASHP no cenário 2 (sem desperdícios) considerando o efeito estufa a montante..... 144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Custo do equipamento e conexões	43
Tabela 1.2 - Variação da temperatura do reservatório com o Método de Petrucci	45
Tabela 1.3 - Custos de um ASBC.....	45
Tabela 1.4 - Custos internacionais iniciais comparados das Opções 2 – SAS-C, 4a – SHPS e 4b - ASHP.....	47
Tabela 1.5 - Preço pago pelo consumidor no Estado da Bahia conforme volume e unidade de uso da água – em R\$.....	50
Tabela 1.6 - Padrões de consumo e despesas mensais com água na Bahia.....	50
Tabela 1.7 - Patamar de consumo mínimo recomendado no NE	51
Tabela 1.8 - Eficiência média dos sistemas ASBC e Convencional	60
Tabela 1.9 - Comparação experimental	61
Tabela 1.10 - Dedução da despesa anual e mensal com sistema auxiliar do SAS-C / R\$.....	62
Tabela 1.11 - Despesas mensais brutas com água e energia na Bahia e de custo do banho - Primeira Aproximação.....	63
Tabela 1.12 - Análise de economicidade de energia (irradiação nordestina).....	66
Tabela 1.13 - Análise de economicidade de água em 20 anos (dois cenários).....	66
Tabela 1.14 - Despesas mensais brutas com água e energia na Bahia e de custo do banho - Segunda Aproximação (cenário 2 e irradiação nordestina).....	66
Tabela 1.15 - Síntese de Economicidade e Ecoeficiência em 20 anos (dois cenários e irradiação nordestina)	67
Tabela 1.16 - Vantagens comparativas	68
Tabela 1.17 - Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida (AICV) - São Paulo (SP)	69
Tabela 2.1 - Ecoeficiencia energética de las rutas.....	98
Tabela 2.2 - Costes en créditos de carbono (en 20 años) a precios de cumplimiento del Acuerdo de Paris (tCO ₂ = US \$ 50)	105
Tabela 2.3 - Costes acumulados em 20 años (ciclo de vida más largo - SCS Convencional)	106

Table 3.1 - Synthesis of economics and eco-efficiency in 20 years (two scenarios and northeast irradiation $\cong 5,4 \text{ kW/m}^2$ in average year)	124
Tabela 4.1 - Custos estocásticos acumulados e unitários do banho e suas respectivas incertezas-padrão*	145
Tabela 4.2 - Diferença entre as estimações estocásticas (Tabela 4.1) e as determinísticas (Tabela 3.1 do Capítulo 03).....	145
Tabela 4.3 - Custos estocásticos acumulados e unitários do banho e seus respectivos intervalos de abrangência	145
Tabela 4.4 - Estimções do Índice de Economicidade e Ecoeficiência (EEI) com $1e+6$ Simulações de Monte Carlo*.....	146
Tabela 4.5 – Intervalos de abrangência dos EEI.....	147

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Differences of focus between the ecological economy and the neoclassical environmental economy.	122
Quadro 3.2 - PDFs das grandezas de entrada no R e no Oracle® Crystal Ball	135

LISTAS DE SÍMBOLOS

Equações Termodinâmicas:

Equipamento:

η_{vol}	-	eficiência volumétrica do compressor
η_{ele}	-	eficiência de conversão eletro-mecânica do motor do compressor
η_{comp}	-	eficiência isentrópica do compressor
v_1	-	volume específico no estado de entrada do compressor
\dot{v}	-	taxa de deslocamento volumétrico do compressor
γ	-	coeficiente de expansão adiabático
C_{leak}	-	coeficiente de vazamento do compressor
C_{cv}	-	coeficiente de volume morto ou nocivo do compressor (<i>clearance volume</i>).
$\mathcal{E}_{e,sup}$	-	efetividade do superaquecimento
$\mathcal{E}_{c,des}$	-	efetividade do desaquecimento
$\Delta T_{sh,static}$	-	grau de superaquecimento mínimo da <i>válvula de expansão termostática</i> (TEV)
$\Delta T_{sh,rating}$	-	grau de superaquecimento nominal da TEV
res_{cap}	-	fator de reserva de capacidade da TEV

Operação:

\dot{m}_e	-	vazão da corrente externa no evaporador
\dot{m}_c	-	vazão da corrente externa no condensador
m_{refri}	-	vazão do fluido refrigerante
$T_{e,i}$	-	temperatura do fluido externo na entrada do evaporador
$T_{c,i}$	-	temperatura do fluido externo na entrada do condensador

Variáveis:

Q	-	taxa de calor trocado
P	-	pressão do condensador
C	-	coeficiente da TEV
T	-	temperatura
W	-	potência consumida
m	-	vazão mássica
h	-	entalpia específica do fluido

Subscritos:

q	-	correntes quente
f	-	correntes fria
i	-	extremidade de entrada de cada corrente;
e	-	correntes
c	-	condensador
$comp$	-	compressor
$evap$	-	evaporação
sup	-	superaquecimento
$cond$	-	condensação
des	-	desaquecimento
min	-	taxa mínima
max	-	taxa máxima
sh	-	superaquecimento
$operating$	-	operação do ciclo
$rating$	-	condição nominal
ele	-	elétrica
res_{cap}	-	reserva de capacidade
$static$	-	pré-operação do ciclo (antes da abertura da válvula)
1, 2, 3, 4 e 5	-	processo correspondente da variável

Ciclo de Equações Termodinâmicas:

A	surface area (m ²)
C	specific heat (kJ/kg K)
COP	heating coefficient of performance
$\cos \varphi$	power factor
\dot{E}	energy rate (kW)
\dot{E}_x	exergy rate (kW)
f	friction factor or exergetic factor (%)
\dot{F}	exergetic fuel rate (kW)
h	specific enthalpy (kJ/kg)
I	current (A), global irradiance (W/m ²)
$I\dot{P}$	improvement potential rate (kW)
\dot{I}	irreversibility (exergy destruction) rate (kW)
\dot{m}	mass flow rate (kg/s)
P	pressure (kPa)
\dot{P}	exergetic product rate (kW)
s	specific entropy (kJ/kg K)
\dot{S}	entropy rate (kW/K)
\dot{Q}	heat transfer rate (kW)
T	temperature (K or °C)
V	voltage (V)
\dot{W}	rate of work or power (kW)

Greek letters

δ	fuel depletion rate (%)
ε	exergy (second law) efficiency
η	energy efficiency
ξ	productivity lack (%)
χ	relative irreversibility (%)
ψ	specific exergy (kJ/kg)

Subscripts

act	actual		
avg	averaged		
c	space cooling		
coll	collector		
comp	compressor		
cond	condenser		
cw	space cooling and water heating		
dest	destroyed (destruction)		
dhwt	domestic hot water tank		
e	evaporation		
elec	electrical	out	outlet, output
evap	evaporator	p	pressure
exp	expansion (throttling) valve	r	refrigerant
fc	fan-coil	scol	solar collector
fh	floor heating	SDHWS	solar domestic hot water system
fhs	floor heating system	sh	space heating
gen	generation	sr	solar radiation
ghe	ground heat exchanger	t	thermal
GSHP	ground-source heat pump	T	total
h	heating	u	useful
HP	heat pump	w	water
i	each unit value	over dot	rate
in	input, inlet	0	reference (dead) state
k	location		
mech	mechanical		

Nomenclature of Heat Systems

ASBC	- Low Cost SHS / Aquecedor Solar de Baixo Custo
ASHP	- Air-Source Heat Pump / Bomba de Calor Flex
CBA	- Cost-Benefit Analysis / Análise Custo-Benefício
CBI	- Cost Benefit Index / Índice Custo-Benefício
ChE	- Electric Shower / Chuveiro Elétrico
GRI	- Global Reporting Initiative / Iniciativa Global de Relatoria
LC-SHS-PP	- Low Cost SHS of Polypropylene / ASBC de PP
LC-SHS-VPC	- Low Cost SHS of Vinyl Polychloride / ASBC de PVC
SDR	- Social Discount Rate / Taxa Social de Desconto
SHPS	- Solar Heat Pump Systems / Bomba de Calor
SHS	- Solar Heating System / Sistema de Aquecimento Solar
PP	- Polypropylene / Polipropileno
VPC ou PVC	- Vinyl Polychloride / Policloreto de Vinila

Variables

$C_{or_{min}}$	- minimum annual operational cost, $r_{min} = 2$, US\$
C_{or}	- annual operational cost of r , US\$
C_c	- annual costs of carbon credits, US\$
B	- sum of the discounted benefits, US\$
$C_{t=0}$	- capital or initial value, US\$
C	- discounts of current cost, US\$
D_r	- amounts of annual costs of wastage of water and energy of the route r , US\$
i	- interest rate, US\$/t
I	- investment expenses (acquisition + installation + maintenance of the system), US\$
IEE	- Index of Economicity and Eco-efficiency (of a path any r)
k	- cycle of life of the route more durable ($\alpha = 20$);
M	- final amount, US\$
P_s	- profitability coefficient, US\$
rs	- Social Discount Rate (SDR), US\$/t
t	- total time, year
W	- cost of the system + energy expenditures + water expenditures (of r 1)/bath, US\$
α	- cycle of life of the technology/route r , year

Subscripts

c	- carbon credits, us\$
min	- minimum
n	- year
o	- opportunity cost, us\$
r	- route/technology

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	19
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTRUTURA.....	19
1.2 TEORIZAÇÕES IMPLÍCITAS E PRODUÇÕES PRELIMINARES.....	22
1.3 PECULIARIDADES DOS PRODUTOS.....	24
REFERÊNCIAS.....	25
APÊNDICE A – QUADRO DE PUBLICAÇÕES.....	28
1 ECONOMICIDADE E ECO-EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA NA ZONA INTERTROPICAL: REVISÃO DA LITERATURA DE EXPERIMENTOS.....	29
1.1 INTRODUÇÃO.....	30
1.2 REVISÃO DA LITERATURA.....	32
1.3 CARACTERIZAÇÃO DAS OPÇÕES TECNOLÓGICAS.....	37
1.3.1 Dilemas locais e globais do aquecimento elétrico.....	37
1.3.2 SAS Convencionais: eficácia e barreira à entrada.....	40
1.3.3 Os ASBC: manufatura e quebra da barreira à entrada.....	43
1.3.4 As bombas de calor como potencial futura opção.....	45
1.3.5 Rentabilidade dos SAS prediais híbridos.....	47
1.4 PARÂMETROS DA UNIDADE USUÁRIA DE SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA..	49
1.4.1 Perfil da demanda de água a custos vigentes.....	49
1.4.2 Experimentos de eficiência: métodos de cálculo.....	52
1.4.3 Experimentos de eficiência: testes dos sistemas.....	56
1.4.4 Perfil da demanda de eletricidade a custos vigentes.....	61
1.5 HIERARQUIZAÇÃO: PRIMEIRO AJUSTE.....	63
1.6 HIERARQUIZAÇÃO: SEGUNDO AJUSTE.....	64
1.7 HIERARQUIZAÇÃO: TERCEIRO AJUSTE.....	67
1.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS - DESAFIOS E OPORTUNIDADES DOS SAS.....	70
REFERÊNCIAS.....	74
ANEXO A - INTERAÇÃO ENTRE AS PRINCIPAIS EQUAÇÕES DO MODELO DO CICLO DE UMA BOMBA DE CALOR.....	86
ANEXO B – EQUAÇÕES DE BALANÇO PARA OS COMPONENTES DO SISTEMA DE AQUECIMENTO POR BOMBA DE CALOR.....	88
ANEXO C - TOTAL DIÁRIO DA IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL NO BRASIL (MÉDIA ANUAL).....	90

2 CONSUMO Y GENERACIÓN DE ENERGÍA COMO MACROSISTEMA ECOLÓGICO: RUTAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA PARA HOGARES TROPICALES	91
2.1 INTRODUCCIÓN.....	91
2.2 RASGOS DE LA DEMANDA	96
2.3 ATRIBUTOS DE LAS RUTAS	98
2.4 ECONOMICIDAD Y ECOEFICIENCIA	105
2.5 CONSIDERACIONES FINALES	110
REFERENCIAS	112
3 WATER HEATING SYSTEMS FOR TROPICAL HOMES: A INDEX OF ECONOMICITY AND ECO-EFFICIENCY	117
3.1 INTRODUCTION.....	117
3.2 DISCUSSION - CHARGE CAPACITY AND ALTERNATIVES CBA.....	119
3.3 HIERARCHIZATION INDEX.....	123
3.4 RESULTS	124
3.5 ACKNOWLEDGMENTS.....	125
3.6 NOMENCLATURE.....	125
3.6.1 Abbreviations.....	125
3.6.2 Variables	126
3.6.3 Subscripts.....	126
REFERENCES	127
4 AVALIAÇÃO ESTOCÁSTICA DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA	133
4.1 SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA	147
4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	148
REFERÊNCIAS	149
5 CONCLUSÕES GERAIS	150
APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO EM R DAS SMC DOS SEIS SISTEMAS ANALISADOS	155
APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO NO ORACLE® CRYSTAL BALL DAS SMC DOS SEIS SISTEMAS ANALISADOS	156

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTRUTURA

Quando o diretor executivo da International Energy Agency (IEA), Nobuo Tanaka, usou, como frase de abertura do documento de suporte técnico à elaboração do Plano de Ação do G8, face aos cenários até 2050, estas palavras: “The world’s current energy prospects are – put simply – unsustainable”, ele apenas preparava o desfecho de que a mudança necessária para alcançar os objetivos mínimos de longo prazo equivalerá não menos que a uma “revolução energética”. A IEA anunciou que o crescimento da demanda por eletricidade urbana é contínuo, sobretudo por parte dos edifícios, e que 75% das suas emissões de CO₂ são hoje devidas a esta demanda, a montante, e que em 2050 esta proporção não tende a diminuir, mas a atingir 85% (IEA, 2016). Conclui que os meios mais importantes para reduzir as emissões dos edifícios nas áreas urbanas são as tecnologias de aquecimento e refrigeração com baixa emissão de carbono e os inovadores “low-energy new buildings” e/ou uma ‘profunda renovação energética dos edifícios existentes’.

Os dados discutidos nos estudos que compõe esta dissertação registram que o chuveiro elétrico responde por uma fração física e econômica significativa da demanda de energia dos lares de muitos países, razão pela qual existe uma tendência global de sua substituição por alternativas; testes de eficácia, simulações, experimentos com novas rotas constituem uma jovem dinâmica: indústrias, incubadoras tecnológicas, faculdades, oficinas votadas às inovações de CO₂ mínima. Claro, reduzir tais emissões diretas/indiretas é apenas um dos múltiplos objetivos ecoeficientes. Penetrar nestes laboratórios, revolucionários à IEA, comparar soluções, por suas economias e ecoeficiências, e oferecer critério de desempate e suporte a tomadas de decisão, é nosso desafio.

A abrangência preferencial destes estudos é intertropical, em função da relação entre as irradiações solares desta faixa e as tecnologias da captação térmicas e/ou híbridas fotovoltaicas. Todavia, algumas destas tecnologias mais limpas são eficazes também em regiões subtropicais. Como casos específicos estudados, com características de expressiva irradiação solar, as regiões tratadas adiante serão as do Nordeste (NE) brasileiro e as do centro-oeste e norte da Bahia e, em geral, as intertropicais onde coletores sofrem irradiações médias entre 5,39 e 5,59kWh/m².

A faixa intertropical está delimitada entre as latitudes 23,27° ao Norte e ao Sul do Equador, linhas imaginárias definidoras, respectivamente, dos Trópicos de Câncer e Capricórnio, por serem as regiões nas quais o Sol incide perpendicularmente ao longo dos solstícios, oscilando esta perpendicularidade desde o verão no Hemisfério Sul (inverno no Hemisfério Norte) no limiar da latitude 23,27° N, descendo até a 23,27° S, quando retorna. Por exemplos continentais, estão entre os países intertropicais, *na América*: Bahamas, Cuba, México e Estados Unidos; Argentina, Brasil, Chile e Paraguai; *Ásia*: Arábia Saudita, Bangladesh, China, Emirados Árabes Unidos, Índia, Myanmar, Omã e Taiwan; *África*: Argélia, Chade, Egito, Mauritânia, Líbia, Mali e Níger; África do Sul, Botswana, Moçambique, Madagascar e Namíbia; na *Oceania*: Austrália.

Esta dissertação está composta por três artigos e uma avaliação da incerteza das grandezas manejadas, via simulações de Monte Carlo, de que são constituídos seus quatro capítulos (com respectivas introduções, desenvolvimento, considerações finais e referências), além da presente introdução geral e das conclusões gerais que sistematizam os principais resultados alcançados. Nesta seção serão apresentados o objeto e objetivos do trabalho, suas motivações, *backgrounds*; seu contexto socioambiental, problemas, métodos de abordagem e as contribuições acadêmicas.

Sumariamente, estas pesquisas consistem, de início, em uma revisão de literatura de experimentos com seis sistemas alternativos de aquecimento de água (Cap. 1), seguida de uma avaliação energética integrada e da elaboração de um algoritmo que combinam análises técnica, econômica e ecológica (Cap. 2 e 3). Tal instrumento é o Índice de Economicidade-Ecoeficiência (EEI) cuja modelagem foi inspirada nas dessemelhanças das Análises Custo Benefício (CBA) tradicionais (neoclássica) e ecológicas. Esta fórmula pela qual os sistemas foram hierarquizados é uma das principais contribuições desta discussão, bem como a abordagem que insere as tecnologias em macrossistemas ecológicos locais-globais. A análise de custos, em termos de CO₂, como variável de entrada deste EEI, por exemplo, é feita com patamares de preços regionalmente ponderados, que visam o cumprimento das metas do Acordo do Clima de Paris. Todos os artigos foram harmonizados em referência a recomendações de preços de Marraquexe.

A questão de partida ou conjunto de problemas sobre os quais esta dissertação se debruça são as implicações do consumo conjunto de água e energia por sistemas e processos “indesejáveis”. Claro está que uma escala e ordem de “preferências” deve ser considerada, conforme cada caso. Assim, é compreensível que, em determinada região, o desperdício de água seja mais repellido; em outra parte, devido a elevados custos locais, pode ser mais gravoso o desperdício de energia;

pode até ser que, devido a uma grande desordem de critério, ambos os desperdícios se esperem. Pode parecer irracional, mas é um fato sociológico que haja contradições entre as decisões individuais e coletivas e/ou entre as opções de curtos e longos prazos quanto a recursos finitos.

A ciência tem passado a conhecer melhor uma modalidade de conflito de interesses, em torno de riquezas comuns ou bens públicos, definida por ações individualistas que podem levar a consequências coletivamente irracionais, jogos de soma zero ou negativas (PRIMO, 2007), argumento pioneiramente desenvolvido por Garrett Hardin no artigo *The Tragedy of Commons*, originalmente publicado na *Science*, já em 1968 (HARDIN, 1968), com base em J. B. Wiesner e H. F. York (1964), tese retomada (HECKATHORN, 1996) e, infelizmente, readaptada até hoje, porque é explicativa (ROCKSTROM, J. et al., 2017). Quando os assuntos são água e energia trata-se tanto de detectar contradições que geram dilemas quanto de resolvê-las por eles.

Escolhas que envolvem desperdícios evitáveis com relativa facilidade, usos muito ineficientes, elevados custos de oportunidade, quase impensado design de produtos, entre outros efeitos cumulativos de tendência local e planetária perigosa, são feitas pela iniciativa privada, governos e organizações não-governamentais, quando não estão arraigadas nos velhos usos perdulários do século XX (STEFFEN, CRUTZEN, MCNEILL, 2007; CRUTZEN, 2002; GROOT, WILSON, BOUMANS, 2002), o que é particularmente verdadeiro quando os recursos são água e energia. Novos cálculos sinalizam que a ecoeficiência não raro é economicamente viável. A International Energy Agency (IEA) sublinha que as tecnologias existentes - principalmente as que propiciam uma crescente eficiência energética – são rotas obviamente desejáveis, mas, em última instância, a maior força motriz ainda está nas oportunidades econômicas e benefícios que estas novas tecnologias prometem para todos os países do mundo (IEA, 2008, 2010, 2016).

Assim, foram considerados, nos quatro estudos desta comunicação, os referenciais econômicos de impacto, na renda familiar, da ineficiência dos sistemas de uso de água e energia (em particular para banhos mornos), seus agravos no consumo geral da família, no Brasil e no exterior, bem como a legislação e Políticas Nacionais relativas à eficiência hídrica e energética.

E o que estas leis e políticas preconizam? A alocação eficiente de recursos hídricos e energéticos, a preservação dos recursos naturais e a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais, regulando níveis máximos de consumo ou mínimos de eficiência de máquinas e aparelhos consumidores de

energia, com base em indicadores técnicos pertinentes (BRASIL, 2001; 1997). Esta dissertação oferece, em cada consideração final de seus capítulos, indicações das opções mais ecoeficientes para aquecimento de água em residências particulares e diferentes conjuntos prediais coletivos.

Estes escopos ou preferência ecológica são explicitados na primeira seção do 1º artigo-capítulo. Os sistemas de aquecimento de água (ou rotas tecnológicas) aqui estudados foram os seguintes:

- 1) Chuveiro Elétrico (aquecimento por resistência);
- 2) Sistemas de Aquecimento Solares (SAS) convencionais;
- 3) SAS de Baixo Custo com placa coletora de Policloreto de Vinilo (PVC);
- 4) SAS de Baixo Custo com placa coletora de Polipropileno (PP);
- 5) Bomba de Calor (Solar Heat Pump Systems – SHPS) exclusivamente para aquecer;
- 6) Bomba de Calor (SHPS) tipo *flex* “ar-ar/água”, com função de aquecer/esfriar;

Objetivou-se identificar os custos de aquisição e operacionalização dos sistemas, suas eficiências relativas quanto aos consumos (e eventuais desperdícios) de energia e água, suas despesas de manutenção e com eventuais necessidades de sistemas auxiliares de energia, os custos de oportunidade destes gastos. Adicionalmente, foram aferidos os custos, em termos de emissão de gases de efeito estufa, de cada sistema quanto à sua eficiência energética e, por fim, foram feitas avaliações da incerteza das grandezas de entrada propagadas às grandezas de saída.

Antes de diferenciar, por suas peculiaridades, os percursos de cada um dos artigos-capítulos, como produtos de um processo de pesquisa, convém sinalizar seus precedentes e pressupostos.

1.2 TEORIZAÇÕES IMPLÍCITAS E PRODUÇÕES PRELIMINARES

Dois *backgrounds* desta dissertação são i) as novas dinâmicas das energias renováveis, particularmente as solares, no Nordeste do Brasil, e ii) as estratégias econômicas e ecoeficientes face a Análises dos Ciclos de Vida (ACV) de produtos e processos.

O primeiro tem assumido um papel cada vez mais central nos estudos do autor, com projetos de continuidade acadêmica, e motivou diretamente os quatro artigos-capítulos desta dissertação, bem como sua colaboração no estudo sobre a complementaridade das energias solar e eólica no Nordeste, desde o Laboratório de Energia (LEN-UFBA) ao Congresso Brasileiro de Energia (CBE) (DE JONG, CUNHA, MOUSINHO, TORRES, SANTOS, PRIMO, 2017).

Quando ao segundo, foram particularmente motivadores temas correlatos à ACV como da logística reversa de materiais para reciclagem e/ou geração de energia e a configuração oligopsônica dos mercados de resíduos sólidos urbanos brasileiros nas regiões metropolitanas (PRIMO, 2012a; 2012b; 2014; 2015; PRIMO, FREIRES, RODRÍGUES, SILVA, 2016; PRIMO, RODRÍGUES, 2015a; 2015b; 2016), estudos realizados com o apoio técnico do PEI-UFBA, da *Universidad Juárez Autónoma de Tabasco* (UJAT, México) e do *Departamento de Matemática y Ciencia de la Computación* da Universidad de La Habana (DMC-UH, Cuba). Um primeira rodada de ACV dos sistemas já foi feita e publicada (PRIMO, SILVA, KALID, 2018).

O ingresso no Mestrado Acadêmico do PEI-UFBA representou uma oportunidade de reorientar, estruturar e requalificar os estudos preliminares do autor sobre ambiente e ecologia industrial. Energias renováveis, prevenção à poluição, ecoeficiência e engenharia de projetos ambientais tornaram-se vertentes de pesquisa que se desdobraram em produtos e nesta síntese dissertativa.

Os chamados “limites planetários” - alguns dos quais já violados, como o das mudanças climáticas, do ciclo global do nitrogênio e da perda da biodiversidade -, estão ainda entre os *backgrounds* desta dissertação, já quase violados os do ciclo do fósforo, acidificação do oceano e da perda da camada de ozônio (ROCKSTROM, J. et al., 2017; ROCKSTRÖM et al., 2009a; ROCKSTRÖM et al., 2009b; CORNELL, 2009), fronteiras co-sublinhadas pelo autor no Congresso de Ensino, Pesquisa e Extensão da UFBA (BITTENCOURT, FERNANDES, ÁVILA FILHO, SILVA, PRIMO, 2017).

Embora desempenhem, em geral, o papel de teorizações implícitas às discussões aqui travadas, tais limites emergem mais claramente nos capítulos 2 e 3, quando da revisão da noção de ‘sustentabilidade’.

1.3 PECULIARIDADES DOS PRODUTOS

O quadro de publicações constante do Apêndice A desta introdução contém as informações relativas à natureza e às destinações dos três artigos-capítulos desta comunicação, cada um deles com seus respectivos resumos/abstracts, além de um quarto capítulo, que rediscute probabilisticamente os resultados determinísticos anteriores sobre economicidade e ecoefici, não cabendo aqui senão destacar algo já não dito.

O capítulo 1 maneja um volume considerável de referências (134) e exigiu onze meses de estudos, mas tem a peculiaridade de ser uma primeira aproximação ao tema, do ponto de vista cronológico, pois suas conclusões ainda não previam os resultados obtidos pelo algoritmo EEI, que geraram as hierarquizações das opções feitas nos capítulos segundo e terceiro, nem as inferências das simulações de impacto ambiental dos ciclos de vida (CV) das rotas principais, quais sejam a do chuveiro elétrico (ChE) e a Solar de Baixo Custo de PVC (ASBC-PVC) principais no sentido de serem, respectivamente, ainda a mais usada e a de menor impacto climático, na acidificação do oceano e de ozônio fotoquímico (PRIMO, SILVA, KALID, 2018).

A abordagem do segundo capítulo é a única que se vale de um arcabouço macro-ecológico, recuperado, nos artigos posteriores, de modo quase implícito, ou na variável emissão de CO₂. Só o capítulo 3 argumenta a necessidade da superação Análise Custo Benefício (CBA) usual: o hábito de uso do algoritmo de juros compostos no tratamento de processos ambientais é revisto.

Considerando a necessidade de abordar as grandezas de entrada das análises de economicidade e ecoeficiência de modo probabilístico, funções densidade de probabilidade as propagaram às grandezas de saída através de Simulações de Monte Carlo, no quarto e último capítulo, com recurso a simulações em R e com o Oracle[®] Crystal Ball, ampliando o raio inferencial e rebustecendo a análise, cujas incertezas passaram por avaliações, conferindo-lhe mais realismo.

REFERÊNCIAS

BITTENCOURT, E.; FERNANDES, F. M.; ÁVILA FILHO, S.; SILVA, M. S.; PRIMO, R. G. B. Aplicação da metodologia do fator 10 na gestão do aterro sanitário de Vitória da Conquista - BAHIA. **Anais**, Congresso UFBA 2017 - Pesquisa, Ensino e Extensão, 2017, Salvador: UFBA, 2017.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001**. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Brasília: Casa Civil, 2001. D.O.U. de 18.10.2001.

_____. Presidência da República. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília: Casa Civil, 1997. DOU de 9.1.1997.

CAVALCANTI, Clóvis. Concepções da economia ecológica: suas relações com a economia dominante e a economia ambiental. **Estudos Avançados**, 24 (68), 2010.

CORNELL, Sarah. Response to Rockström *et al.* (Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity): On the System Properties of the Planetary Boundaries. **Ecology and Society** 17(1): r2, 2009.

CRUTZEN, P. Geology of mankind: the Anthropocene. **Nature**, 415, 23, 2002.

DE JONG, P.; CUNHA, F. B.; MOUSINHO, M. C. A. M.; TORRES, E. A.; SANTOS, J. A.; PRIMO, R. G. B. A complementaridade da energia eólica e solar na Bahia. **Anais**, Congresso Brasileiro de Energia, 2017, Rio de Janeiro. Congresso Brasileiro de Energia, 2017.

GROOT, Rudolf; WILSON, Matthew A.; BOUMANS, Roelof M. J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. **Ecological Economics** 41 (SPECIAL ISSUE: The Dynamics and Value of Ecosystem Services: Integrating Economic and Ecological Perspectives, 2002), pp. 393–408.

HARDIN, G. Tragedy of the Commons. **Science** 162: pp. 1243-48, 1968.

HECKATHORN, D. The Dynamic and Dilemmas of Collective Action, **American Sociological Review**, 61(April): pp. 250-277, 1996.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy, Technology, Perspectives**: In support of the G8 Plan of Action. Paris: OECD/IEA, 2008.

_____. **Energy, Technology, Perspectives**: Scenarios & Strategies. Paris: OECD/IEA, 2010

_____. **Energy, Technology, Perspectives: Towards Sustainable Urban Energy Systems.** Paris: OECD/IEA, 2016.

PRIMO, R. **Entre a Tragédia dos Comuns e o Federalismo Recíproco: Uma Reforma Tributária para Além dos Arranjos Neo-institucionais?** 1. ed. Brasília: IPEA-CAIXA, 2007.

_____. **Cooperativismo e Liberdade no Século XXI.** Salvador: CEALA, 2012a.

_____. Política Transversal de Regulação do Mercado Oligopsônico de Resíduos Sólidos nos Carnavais de Salvador de 2007 a 2012 por meio de um Complexo de Economia Solidária, **Isegoria - Ação Coletiva em Revista**, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, year 1, vol. 1, n. 2, 2012b.

_____. Comércio Justo & Mercados Imperfeitos I: Fundamentação Teórica”, **Revista Dialética**, v. 5, n. 5, 2014, p. 47.

_____. Regulação de Logísticas Reversas nos Mercados Sub-Regionais de Reciclagem de Resíduos Sólidos: Enlace do Preço Justo Nacional aos Sistemas RFID”. n. Brasil. **Prêmio Celso Furtado 2015.** The International Celso Furtado Center of Developed Politics: Ministério da Integração, Brasília, 2015.

_____.; FREIRES, F.; RODRÍGUES, J.; SILVA, M. Tripartite Regulation of Inverse Logistics For Solid Waste. **5th World Conference on Production and Operations Management – P&OM**, Habana, 2016.

_____.; RODRÍGUEZ, J. Project of Calculated Characterization of Monopsonic Degree into the Waste Solid Market in Large Metropolitan of Brazil, **I Workshop Models and Methodologies to Support Decisions Applied to Health and Environment Management**, 1(1), UFCE, Fortaleza, 2015a.

_____.; RODRÍGUEZ, J. Between the Exploitation Oligopsonic and Fair Trade in Reverse Logistics of Solid Waste in Brazil: Mathematical Foundations, Transition Regulatory and Proposal of Policy in Three Steps. In.: Herrera, C. et al. (Ed.). **Experiencias en la Modelación de la Toma de Decisiones en la Salud Humana, Medio Ambiente y Desarrollo Humano**, Tome 1. Habana: Rideca, 2015b.

_____.; RODRÍGUEZ, J. **Calculating Characterization of Monopsonic Degree in the Recycled Solid Waste Market in Metropolitan Regions of Brazil.** New York, EUA: Editorial Nova Publishers, 2016.

_____. SILVA, M.; KALID, R. Uncertainties of the LCA of Two Water Heating Routes. **Anais**, 3th International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management (ICVRAM), 4th International Symposium on Uncertainty Quantification and Stochastic Modeling (UNCERTAINTIES) e 7th International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis (ISUMA), Florianópolis, 2018.

ROCKSTRÖM, Johan et al. A safe operating space for humanity. **Nature**, vol 461 (24), September, 2009a.

_____. et al. Planetary Boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. **Ecology and Society**, In Press 14th September, 2009b.

_____. et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Sciencexpress**, Page 1, 10.1126, Science, 1259855, 15 january, 2015.

STEFFEN, W.; CRUTZEN, P.J.; MCNEILL, J.R. The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of Nature? **Ambio**, 36, 614-621, 2007.

WIESNER, Jerome B.; YORK, Herbert F. National security and the nuclear-test ban. **Scientific American**, v. 211, n. 4, p. 27-35, 1964.

APÊNDICE A – Quadro de Publicações

ARTIGO	AUTORES	MODALIDADE	DESTINO	SITUAÇÃO ATUAL	OBSERVAÇÕES
Economics and eco-efficiency of water heating systems in the tropics	<i>Rilton Primo; Marcelo Silva; Pieter de Jong; Ricardo de Araújo Kalid</i>	REVISTA	<i>Renewable & Sustainable Energy Reviews</i> Link: https://www.journals.elsevier.com/renewable-and-sustainable-energy-reviews/	PRONTO. Revisão Final do Inglês. Submissão em julho, 2018.	QUALIS: A1 Engenharia III
Consumo y generación de energía como macrossistema ecológico: Rutas de calentamiento de agua para hogares tropicales	<i>Rilton Primo; José Rodríguez; Marcelo Silva; Pieter de Jong; Ricardo de Araújo Kalid</i>	CAPÍTULO DE LIVRO INTERNACIONAL	LIVRO: <i>Algoritmos, estrategias y modelos en las aplicaciones de métodos cuantitativos. Tomo 1. Serie "Métodos Cuantitativos Aplicados". Responsable Editorial: Red Iberoamericana de Estudios Cuantitativos Aplicados (RIDECA). Link: http://rideca.cs.buap.mx/</i>	PUBLICADO em 09 de março de 2018, na <i>13th International Conference on Operations Research (ICOR)</i>	A RIDECA congrega 25 universidades europeias e americanas.
Water heating systems for tropical homes: A index of economicity and eco-efficiency	<i>Rilton Primo; Daniel Kouloukoui; José Rodríguez; Marcelo Silva; Pieter de Jong; Ricardo de Araújo Kalid;</i>	CONFERÊNCIA INTERNACIONAL	<i>The 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2018). Link: http://www.ecos2018.org/</i> Selected papers are planned to be published in scientific journals: <ul style="list-style-type: none"> • ENERGY Journal (Special Issue); • International Journal of Thermodynamics; • The International Journal of Sustainable Energy Planning 	PUBLICADO: Aprovado pela Comissão Científica. Publicação: junho, 2018.	REALIZAÇÃO: June 17-22, 2018, Guimarães, Portugal.
		CONGRESSO BRASILEIRO	Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (CBPE). Link: https://www.xicbpe.com.br/	APROVADO (Resumo) pelo Comitê Científico	REALIZAÇÃO: 11-14 setembro de 2018, Cuiabá, MT, Brasil.
Uncertainties of the LCA of Two Water Heating Routes	<i>Rilton Primo; Marcelo Silva; Ricardo de Araújo Kalid</i>	CONFERÊNCIA E SIMPÓSIO INTERNACIONAIS	<i>3th International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management (ICVRAM), 4th International Symposium on Uncertainty Quantification and Stochastic Modeling (UNCERTAINTIES) e 7th International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis (ISUMA), Link: http://icvramisuma2018.org/</i>	PUBLICADO: 11 abril, 2018.	REALIZAÇÃO: Florianópolis -SC, Brasil, de 8 a 11 de abril de 2018.

1 ECONOMICIDADE E ECO-EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA NA ZONA INTERTROPICAL: REVISÃO DA LITERATURA DE EXPERIMENTOS¹

Corresponding author: *Rilton Primo*^a;

a: Post-Graduate Program in Industrial Engineering at the Federal University of Bahia (PEI-UFBA). Rua Aristides Novis, nº 2, 6º Andar. Federação. Salvador-Bahia. Brasil. E-mail: rilton@ufba.br

Pieter de Jong^a;

a: Post-Graduate Program in Industrial Engineering at the Federal University of Bahia (PEI-UFBA) Rua Aristides Novis, nº 2, 6º Andar. Federação. Salvador-Bahia. Brasil. E-mail: pieterj@ufba.br

José Rodríguez^b

b: Universidad Juarez Autonoma de Tabasco (UJAT). Av. Universidad s/n, Magisterial, 86040 Villahermosa, Tab. México. E-mail: jfgr55@hotmail.com

Marcelo Santana Silva^a;

a: Post-Graduate Program in Industrial Engineering at the Federal University of Bahia (PEI-UFBA) Rua Aristides Novis, nº 2, 6º Andar. Federação. Salvador-Bahia. Brasil. E-mail: profmarceloifba@gmail.com

Ricardo de Araújo Kalid^c

c: Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB). Centro de Formação em Tecno-Ciências e Inovação. Campus Jorge Amado, Rua Itabuna, s/n, Rod. Ilhéus-Vitória da Conquista, km 39, BR 415. Ferradas 45.6132-04. Itabuna-Bahia. Brasil. E-mail: ricardo.kalid@gmail.com

ABSTRACT

This study reviews the literature of experiments on the energy efficiency and economicity of four ways to supply hot water in building systems in tropical regions, taking as a case study the Northeast (NE) of Brazil, where solar irradiation is large throughout the year. These include way 1) Electric Showers, 2) Conventional Solar Heating System (SHS), 3) Low Cost SHS, subdivided into two models (with polyvinyl chloride and polypropylene collector plate) and finally 4) Solar Heat Pump Systems (SHPS), also in two models (exclusive for heating and reversible for cooling). On different aspects the debate is not closed, by climatic specificities or regional and state technological dynamics, often surrounded by economic restrictions, or by resistance to innovations. This article aims to indicate the most ecoefficient way to supply heated water in building systems, considering the local irradiation and the economic environment. The present research turned to the review of the literature on the experiments of water and energy efficiency of six water heating systems, with estimates for vertical sets in the intertropical zone. These reviews have identified that the literature is geared primarily to the thermal, economic and material viability of the systems, but incipient in ordering their ecoefficiencies. The main objective of this review is to identify the main research trends of a set of 107 articles, books and book chapters, 28 dissertations, 06 theses, 04 standards and a federal report. The search platform used was the Portal of Periodicals of Capes, with the time horizon of the year 2000 to the actuality and global and, particularly, Brazilian space coverage, in which the productions of the Federal Universities of Rio Grande do Sul (UFRS), Rio Grande do Norte (UFRN) and Santa Catarina (UFSC). Mathematical optimization models such as the Conjugated Gradients method, Computational Fluid Dynamics or the ReCiPe Midpoint method are consulted to evaluate the technologies. Considering specific perspectives such as economicity and greenhouse gas emissions ecoefficiencies, it was possible to rank all the ways and to indicate tie-breaking criteria in some cases where they were equivalent in cost. Gross costs and opportunity costs of water and energy use, auxiliary energy use, investment and reinvestment flows, over 20 years in two future scenarios were considered, the first involving water waste, the second not. Results show that globally the SHS is the most promising for the NE, particularly in the midwest and north of the state of Bahia, followed by SHPS, but not yet industrialized on a large scale and are indicated as a future option for shaded or sub-regions with lower irradiation in the NE such as the east-central and south of Bahia.

Keywords: Eco-efficiency. Economicity. Conventional and Low Cost SHS. SHPS.

¹ Artigo a ser submetido, em julho de 2018, à *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Qualis: A1 | Engenharia III. Link: <https://www.journals.elsevier.com/renewable-and-sustainable-energy-reviews/>

1.1 INTRODUÇÃO

Uma gama de variáveis socioambientais está imbricada quando os usos da energia e da água são simultâneos. As mudanças climáticas e a crise hídrico-energética têm impulsionado inovações, revisto opções tecnológicas e motivado estudos que otimizem os custos e impactos do uso destes bens finais e itens da cadeia de suprimento, processo premente em muitos países.

Este estudo visa indicar as opções i) mais econômicas (do lado da demanda) e ii) mais ecoeficientes no aquecimento de água em residências unifamiliares, prédios residenciais e/ou comerciais, embora seja um exercício estimativo, considerando condições específicas de clima, sistemas e do ambiente econômico em que estão inseridos, valendo como exemplo de combinação de variáveis para estudos de caso intertropicais face às literaturas de experimentos.

A International Energy Agency (2016) estimou que 75% das emissões de CO₂ dos edifícios ao redor do mundo são hoje devidas à sua crescente demanda por energia a montante e que, em 2050, esta proporção tende a elevar-se a 85%, do que recomenda tecnologias de aquecimento e refrigeração com baixa emissão de carbono, objetivo a que se alinham crescentemente as legislações nacionais/subnacionais tropicais, inclusive os objetivos das políticas nacionais de recursos hídricos e de conservação e uso racional de energia brasileira (BRASIL, 1997, 2001).

A abrangência preferencial deste estudo é intertropical em função da relação entre as irradiações solares desta zona e as tecnologias da captação térmicas, menos eficazes em zonas subtropicais. Como casos específicos estudados, com características de expressiva irradiação solar, as regiões tratadas adiante serão as do Nordeste (NE) brasileiro e, dentro dela, as do Centro-Oeste e Norte da Bahia, onde as eficiências dos sistemas aproximam-se de seus limites, submetidos às maiores irradiações do Brasil, chegando a impor 6,5 kWh/m² (CBEM, 2015) à resistência dos materiais.

Em contraste ao mais difundido sistema de aquecimento de água para residências do Brasil, NE e Bahia - o chuveiro elétrico -, doravante Opção 1 - ChE, serão examinadas três outras opções:

- Opção 2 – SAS-C: Sistemas de Aquecimento Solares (SAS) convencionais, dos quais alguns modelos já são industrializados no Brasil;

- Opção 3 - ASBC: SAS de baixo custo, também chamados ASBC ou de bricolagem, em especial o feito pelo Centro Incubador de Empresas Tecnológicas (CIETEC), sediado no campus da Universidade de São Paulo (USP/IPEN), a preço médio em torno de 10% do convencional, com a vantagem de ser padronizado, testado e convalidado por especialistas desde 2001. Nesta linha serão discutidos dois modelos:
 - Opção 3a – ASBC-PVC: ASBC com placa coletora de Policloreto de Vinilo (PVC);
 - Opção 3b – ASBC-PP: ASBC de Polipropileno (PP);
- Opção 4- SHPS: Sistemas de Bomba de Calor (Solar Heat Pump Systems - SHPS), relativamente pouco difundidos no estado e no país hoje, também em duas modalidades:
 - Opção 4a - SHPS: SHPS exclusivamente feita para aquecer;
 - Opção 4b – SHPS Flex: SHPS tipo *flex* “ar-ar/água”, com função de aquecer/esfriar.

As eficiências destas seis opções quanto ao uso de água e energia são desiguais e há mister comparar os sistemas inteiros. Além disto, as coordenadas geográficas e o clima local influenciam nos desempenhos destas opções. É necessário, em dado momento, diferenciar eficiências equivalentes por critérios externos à eficiência. A probabilidade de empates eleva-se no curso dos ciclos de vida. Assim, importa aqui observar a economicidade e a ecoeficiência dos sistemas ao longo de toda a sua vida útil, cujos componentes principais atingem vinte anos.

A quantidade de estudos na direção da eficiência tem se elevado ao ponto de justificar outros que os sistematizem por objetos, objetivos, métodos, experimentos e resultados, revisões que demonstram que eles são voltados, fundamentalmente, às viabilidades térmica, econômica e de materiais dos sistemas, e não tanto a ordenar suas ecoeficiências (ALMEIDA, 2016; GONÇALVES, 2016; HALAWA; CHANG; YOSHINAGA, 2015; TIAN; ZHAO, 2013; HEPBASLI; KALINCI, 2009; KARA; ULGEN; HEPBASLI, 2008), incipiência que este estudo procurará amenizar. O fará, todavia, em termos da estimação do custo dos impactos das emissões de CO₂ somado aos custos diretos e de oportunidade.

Esta análise descende de estudos que a complementam: i) uma avaliação das mesmas opções quando inseridas em um macrosistema ecológico, tomando como referência a precificação das emissões recomendada pelo Acordo de Paris, também utilizada aqui (PRIMO; RODRÍGUEZ; SILVA; DE JONG; KALID, 2018), ii) uma simulação de 16 impactos ambientais de dois dos principais sistemas analisados, o chuveiro elétrico e o ASBC de PVC, através do software SimaPro, com adaptação do banco de dados do Ecoinvent e avaliação das incertezas das análises dos seus ciclos de vida, cujos indícios serão retomados na crítica da literatura (PRIMO; SILVA; KALID, 2018) e iii) uma modelização de algoritmo ou *Índice de Economicidade-Ecoeficiência*, para a hierarquização dos sistemas, cujos *inputs* e *outputs* serão em boa parte rediscutidos no presente artigo (PRIMO; SILVA; DE JONG; KOULOUKOU; KALID, 2018).

Em termos metodológicos as etapas aqui seguidas podem ser sumarizadas nestes cinco procedimentos:

- I. Revisão da literatura de experimentos;
- II. Caracterização das seis opções tecnológicas;
- III. Caracterização do perfil da demanda hidro-energética a custos vigentes;
- IV. Em três aproximações de cálculo sucessivas, análises conjuntas de
 - a) eficiência hídrica, conforme dois cenários, com e sem desperdícios;
 - b) eficiência energética, conforme a necessidade de uso de energias auxiliares;
 - c) custos brutos e de oportunidade;
 - d) impacto de CO₂ a montante, conforme a matriz energética local;
 - e) impacto de resíduos, considerando a Logística Reversa ou não dos sistemas mais impactantes;
 - f) custo final por banho;
- V. Hierarquização final dos sistemas.

Estruturalmente, este artigo compõe-se, além desta introdução, de uma segunda seção preliminar, que sistematiza a revisão de literatura; na terceira seção são definidos os parâmetros físicos e econômicos da unidade familiar predial demandante de água aquecida. As principais vantagens e impactos das opções de aquecimento serão objeto das seções 4, 5 e 6. A sétima seção compara e ordena as opções por sua economicidade e ecoeficiência, frisando, por fim, os potenciais dos SHPS. A conclusão sistematiza os resultados, considerando oportunidades e desafios para o uso racional do aquecimento de água em regiões tropicais, NE do Brasil e Bahia.

1.2 REVISÃO DA LITERATURA

A literatura mundial atingiu tantos pontos específicos da análise que tem ensejado a si mesma ampla visão do entorno: buscar objetivos térmicos a custos mínimos é economicidade, mas esta não é necessariamente ecossistêmica; e o inverso: as opções tecnológicas com melhor desempenho ecológico são inviáveis se têm custos excessivos. Isto não significa que estas conclusões sejam sempre desenvolvidas. A percepção dos gastos, e.g., usualmente é contábil, não considera custos de oportunidade. Por sua vez, é recente a percepção de que o mais ecológico possa ser em geral e promissoramente o mais econômico para as nações (IEA, 2016).

A presente revisão usou o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (PP-Capes) do Ministério da Educação e Cultura (MEC) como principal plataforma de localização dos repositórios institucionais brasileiros e do exterior, permitindo identificar tendências. Com ênfase nas linhas de pesquisa dos três principais centros de excelência do país, quais sejam as universidades federais do Rio Grande do Sul (UFRS), Rio Grande do Norte (UFRN) e Santa Catarina (UFSC), foram prospectadas, com horizonte temporal a partir do ano 2000, comunicações tecnocientíficas relativas a experimentos com sistemas de aquecimento solares e bombas de calor, entre os quais foram analisados e compõe o conjunto das referências deste estudo 107 artigos, livros e capítulos de livros, 28 dissertações e seis teses; quatro normas e um relatório federal constam ainda dos documentos analisados.

O estado da arte da ecologia industrial aplicada a temas afins a sistemas opcionais de aquecimento de água para habitações é embrionário, potencial não realizado com avaliações estritas de viabilidades técnicas e econômicas, relativamente numerosas no Brasil e exterior desde 2000 (ALMEIDA, 2016; GONÇALVES, 2016; OLIVEIRA, 2016; MEDEIROS et al., 2015; ABREU, 2015; CARVALHO, 2015; COLLE; KOLLER, 2014; CARMINATTI, 2014; ALVES, 2014; THOMAZ, 2004, LARA; FACHIN, 2013; HEPBASL; KALINCI, 2009; REIS, 2009; SOUZA; SANTOS; FÉLIX, 2008; SANTOS, 2008; COLLE; KRATZENBERG; BEYER; COLLE, 2006; SALAZAR, 2004, ABREU; RÜTHER, 2001). A maior parte destes estudos está no repositório de pesquisas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (PEM-UFSC), mas há outros. O Laboratório de Energia Solar (LES) da UFRN estuda, desenvolve e constrói sistemas de ASBC, cumulando progressos que não cabe aqui historiar, mas selecionar a este debate (OLIVEIRA, 2016; OLIVEIRA, 2011; GOMES, 2010; LOPO, 2010; REIS, 2009; SANTOS, 2008; COSTA,

2007). As universidades federais do Rio Grande do Sul, de Santa Maria, Uberlândia e outras bases têm também aportado contribuições ao exame teórico e empírico dos desempenhos e eficiências dos sistemas de aquecimento solares (MANEA; DA ROSA; KRENZINGER, 2017; THOMAZ, 2014; MANEA, 2011; POZZEBON, 2009; SIQUEIRA, 2009; SIQUEIRA, 2003).

Um sistema é mais ecoeficiente que outro quando considerado em seus três momentos de impactos: 1) pré-operacionais (extração de matérias-primas, transformação e transporte), 2) operacionais (uso, depreciação e manutenção) e 3) pós-operacionais (destinação final). A Análise do Ciclo de Vida (LCA) é uma das abordagens propícias à estimação das ecoeficiências, mas ela raro é feita e já inspira cautelas: no final trataremos de dois destes exemplos, do que adiante-se ser sempre cogente estimar suas incertezas face à qualidade dos dados (INMETRO; ABNT, 2008. p. 50). A maioria das fontes está concentrada na eficiência, que pode ser econômica (mais efeito, a menor custo) ou física (mais *output*, com menos *input*).

O efeito pretendido é o aquecimento e a oferta de água, particularmente para banho, a cerca de 40°C. Não é suficiente que isto possa ser alcançado minimizando gastos, insumos, recursos e desperdícios. Um dos principais vetores de impacto ambiental destes sistemas é a emissão de CO₂ devido à sua eventual demanda de energia, a montante, e isto pode acontecer com ambas as eficiências no máximo. A relação é direta, neste caso, entre a eficiência energética e a ecoeficiência, esta derivando daquela. Mas estes cálculos precisam ser feitos pelas purezas das matrizes energéticas locais, à parte os impactos a jusante e operacionais da opção em si.

Cada alternativa de aquecimento, portanto, precisará ser observada dentro de um contexto específico. Pode ela emitir CO₂ quando de sua operação, mas o decisivo, frisado nesta pesquisa, é sua emissão a montante. Sobre esta, empregar-se-á a modelação resultante de um processo de harmonização de estimações, que utilizou um procedimento meta-analítico de síntese dos resultados sobre os impactos, por ajuste das estimativas revistas na literatura, considerando a compatibilidade ou não de métodos e hipóteses, gerando taxas únicas de *outputs* de cada opção de geração de energia da matriz (MIRANDA, 2012). Como nos exemplos supramencionados de revisões, Miranda (2012) abriga em si uma prospecção extensiva da literatura especializada.

Como é natural, estudos locais recentes têm precedentes internos e externos que só cabe aqui pontuar: historicamente, o SAS convencional é tecnologia mundialmente conhecida desde fins dos anos 1950 e passou a ser dominada no Brasil ao menos a partir da década de 1970,

descendendo dos estudos, modelagens e experimentos pioneiros de Bliss (1959), Hottel e Willier (1959) que mereceram, em especial entre os anos 1980-90, a atenção de pesquisas sistemáticas no Brasil e no exterior, sobretudo voltadas à sua viabilidade técnico-econômica e à sua performance (BEZERRA; 1986; SINHA; TIWARI, 1994; SOKOLOV; RESHEF, 1992; SONG; ZHANG, 1982; SOPIAN; SAHARI; OTHMAN; LUBIS; ZULKIFLY, 1998; FIGUEREDO, 1990; TULLY, 1995; TARNIZHEVSKI et al., 1992).

Portanto, não é casual que o padrão destes SAS e símiles seja atualmente bem regulado no Brasil: a modelagem e testes de Hottel, Willier e Bliss relacionaram variáveis associadas à sua eficiência, gerando reformulações e normas (POZZEBON, 2009; SIQUEIRA, 2009; ABNT, 2008a; 2008b, 2009a, 2009b) que especificam i) a durabilidade (incluindo resistência mecânica), confiabilidade e segurança e desempenho térmico dos coletores solares de aquecimento de líquidos (NBR 15747-1 e NBR 15747-2) e ainda ii) os métodos de ensaio para a validação destas especificações (NBR 15747-2). Por sua vez, a NBR 11704 classifica os sistemas de conversão fotovoltaica de energia solar em elétrica e a NBR 15569 estabelece os requisitos para o Sistema de Aquecimento Solar de água em circuito direto (SAS), considerando aspectos de concepção, dimensionamento, arranjo hidráulico, instalação e manutenção, onde o fluido de transporte é a água. Tais parâmetros condicionam os custos de produção. Dentro deles, todavia, existem inúmeras combinações possíveis, da mais custosa à ótima.

Por sua vez, as pesquisas sobre as SHPS para aquecer água também vêm sendo realizadas desde a década de 1950 e, analogamente, a literatura sobre este conjunto de opções ainda não tem estado focada em sua ecoeficiência, mas em sua estrutura física, propriedade funcionais, termodinâmica, fluidos de trabalho, controle de operação, simulação numérica e análise econômica (HEPBASLI; KALINCI, 2009; KARA; ULGEN; HEPBASLI, 2008; HEPBASLI, A.; ERBAY, Z.; ICIER, F.; COLAK, N.; HANCIOGLU, 2007). A análise de 22 fontes (Fig. 1) permite inferir que a maioria delas é experimental, voltada a aquecer água e com enfoque energético; somente duas têm viés de exergia (ver equações dos resultados na subseção 1.4.2.3).

Figura 1 - Principais estudos realizados em sistemas SHPS

Classification	#	Year	Investigator(s)	Type of study		Type of system		Application type			Type of analyze		Results
				Theoretical (simulation)	Experimental	Heating	Cooling	Water heating	A/C	Other	Energy	Exergy	
Ground-source heat pump	1	2001	Swardt and Meyer	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			For simulation/experimental: COP _{heating-air source} = 3.315/2.998; COP _{cooling-air source} = 2.743/2.504; COP _{heating-ground source} = 3.320/3.307; COP _{cooling-ground source} = 3.190/3.049; COP _{heating} = 1.656; COP _{system} = 1.339; Heat pump water heater: COP = 2.4
	2	2003	Hepbasli et al.		✓	✓		✓		✓			
	3	2008	Biaou and Beriner	✓		✓	✓	✓		✓			
Air-source heat pump	4	1979	Sloane et al.	✓	✓	✓		✓					COP = about 2.0–2.8 (18–35 °C ambient air, 27 and 4.4 °C source water) Thermoelectric technology storage tank water heaters about a 13% reduction in energy consumption were achieved COP = f(T _e)T _c : evaporation temperature. Run 1 at an air temperature of 20 °C; COP = 4.0. Run 2 the temperature of the water and the air 10 °C; COP = 3.68 For three function model—Mode 1: space-cooling and water heating; COP _{cw-avg} = 4.02, COP _{c-avg} = 2.91. Mode 2: water heating only; COP _{w-avg} = 3.42, 3.25, 2.52, 2.00 (for T ₀ = 31, 25, 15, 4.5 °C). Mode 3: space heating only COP _h = 2.72 In Sydney Australia 40 Mj/day peak winter load: COP _{integral-condenser} = 2.3 and annual energy saving = 56%; COP _{external-condenser} = 1.8 and annual energy saving = 44% COP _{winter} = 2.61 (for T ₀ = 0 °C); COP _{summer} = 5.66 (for T ₀ = 35 °C); COP _{spring/autumn} = 4.817 (for T ₀ = 25 °C)
	5	1998	Harata et al.		✓	✓		✓					
	6	2000	Ito and Miura	✓	✓	✓		✓					
	7	2003	Ji et al.		✓	✓	✓	✓		✓			
	8	2004	Morrison et al.	✓	✓	✓		✓					
	9	2007	Zhang et al.		✓	✓		✓					
Solar-assisted heat pump	10	1976	Sakai et al.		✓	✓	✓	✓		✓			– (in the 30–70 Hz frequency range): COP _h = 2.5–4.0 COP _{system} = 6.0; η _{evap-coll} = 0.080, η _{air-coll} = 0.77 COP _{daily-total} = 1.7–2.5 (year around); T _{water} = 57.2 °C COP _{monthly-avg} = 4–6; η _{coll} = 40–60% COP _{HP-mode} = 2.58; COP _{hybrid-mode} = 3.32 The monthly averaged COP = 3.98–4.32; T _{water} = 55 °C COP _{seasonal-avg} = 5.25; η _{coll} = 1.08; ε _{system} = 21%; T _{water} = 50.5 °C ε _{GSHP} = 72.33%, ε _{SDHWS} = 14.53%, ε _{SYSTEM} = 44.06%. Exergetic COP: COP _{GSHP} = 0.245, COP _{SYSTEM} = 0.201
	11	1996	Chaturvedi et al.	✓	✓	✓		✓					
	12	2003	Hawladar et al.	✓	✓	✓		✓					
	13	2003	Chyng et al.	✓	✓	✓		✓					
	14	2003	Kuang et al.	✓	✓	✓		✓					
	15	2005	Huang et al.	✓	✓	✓		✓					
	16	2006	Guoying et al.	✓	✓	✓		✓					
	17	2007	Li et al.		✓	✓		✓				✓	
	18	2007	Hepbasli		✓	✓		✓		✓		✓	
Gas engine-driven heat pump	19	2005	Lian et al.		✓	✓	✓	✓		✓			Payback period years: GEHP-WLHPS 2; EHP-WLHPS 2.6 η _{thermal} = 28.6% at max. output; η _{engine} = 29.7% for T ₀ = 5 °C Q _{cooling} = 275 kW, Q _{heating} = 380 kW, T _{water} = 70 °C. For 2001 data district heating thermal unit price about = 5.5 c€/kW h; A detailed review on GEHPs was made
	20	2005	Zhang et al.	✓	✓	✓		✓					
	21	2006	Lazzarian and Noro	✓	✓	✓	✓	✓			Economically evaluated		
	22	–	Hepbasli et al.	✓		✓	✓	✓		✓			

Fonte: Hepbasli e Kalinci (2009).

Voltando ao Brasil e aos SAS, pode-se segmentar a literatura, por *stakeholders*, em cinco categorias:

- 1) para *empreendimentos de construção civil* (FARIAS; MEDEIROS; CÂNDIDO, 2016), hotéis e resorts (BAPTISTA, 2006; OLIVEIRA, 2011; CARDOSO, 2006).
- 2) para os *residentes em sistemas prediais* demandantes de água esquentada (MEDEIROS et al., 2015; MAGAGNIN, 2010; ALTOÉ; FILHO; CARLO, 2012; COELHO, 2011).
- 3) para *empreendimentos habitacionais de interesse social*, ou ainda em *vilarejos populares e residências rurais* (BASSO; SOUZA; SIQUEIRA; NOGUEIRA; SANTOS, 2010; BOSCOLI, 2010; FANTINELLI, 2006; TUTIA, 2015).
- 4) para *uma ampla faixa de usuários* com “restrições orçamentárias”, a quem é acessível apenas o SAS de Baixo Custo (LOPO et al., 2010; GOMES et al., 2010; GUERRA; VARELLA, 2014; FANTINELLI, 2006; SPRENGER 2007; SIQUEIRA, 2009).
- 5) para *simulações computacionais e desenvolvimento de software* para projetos de SAS (SIQUEIRA; 2003; SOUZA, 2009; BORGES, 2000).

Ambos os campos da literatura - sobre os SAS e sobre os SHPS - ressentem-se de não apresentarem estudos sistemáticos que hierarquizem de forma combinada eficiências econômicas, hídrico-energéticas e ecológicas. O tema tem nexos indissolúveis e os usos simultâneos da água e energia requerem análises conjuntas.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DAS OPÇÕES TECNOLÓGICAS

1.3.1 Dilemas locais e globais do aquecimento elétrico

A opção do chuveiro elétrico requer relativamente baixo investimento e barata manutenção (troca de resistência), esquentar água com rapidez, não implica no desperdício de água, caso o usuário use racionalmente a água e não haja vazamentos e, por isto, em 2004 ela já estava sendo utilizada por quase 97% das habitações brasileiras (BRASIL, 2009). Porém, um conhecido

dilema nasce do viés inclusivo do chuveiro elétrico, que sai caro ao incluído e ao meio ambiente. Nesta época, gastavam 22,8% da renda dos que trabalhavam por até 2 salários mínimos (consumo médio de 20,3 kWh/domicílio/mês) (ACHÃO; SCHAEFFER, 2004). Hoje, com banhos de oito a dez minutos, tal opção representa ao menos 40% do consumo de energia elétrica nas habitações das classes menos favorecidas (RUSSI et al., 2012). A operação da Opção 1 - ChE draga energia elétrica, não funciona em caso de queda do fornecimento de energia, tem usado fontes de energia não-renováveis e tem sobrecarregado os sistemas de transmissão às horas de pico (6 p.m. e 9 p.m.). As duchas elétricas são responsáveis no Brasil, que é um dos raros países que empregam amplamente esta Opção 1 – ChE, por 43% dos 4 GW reservados pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) para suportar a demanda de energia elétrica neste intervalo de pico. (COLLE; KOLLER, 2014).

Quanto mais cara e ambientalmente impactante é a geração de energia elétrica e quanto mais são atingidos os limites do sistema de transmissão, tanto mais os diversos países têm estímulos a pesquisar e experimentar soluções para o cenário, e, notadamente, os intertropicais vêm encontrando rotas tecnológicas eólicas, solares e híbridas viáveis. As matrizes energéticas brasileira e baiana ainda são em grande parte hidrelétricas e antigas, mas as secas as ameaçam.

Quanto ao potencial de geração hidrelétrica da região Nordeste (NE), a que mais sofre com as estiagens, frise-se que o estresse hídrico que a tem afetado, no período de 2012 a 2017, é o pior já registrado, tendo a Bacia do São Francisco (BSF) atingido, no quadriênio 2014 a 2017, o menor fluxo de todos os tempos. Para agravar o quadro, as previsões são de que a mudança climática diminuirá o volume de precipitação anual no NE e de fluxo da BSF, respectivamente, em 47% e 80%, até 2050, comprometendo sua matriz hidrelétrica (DE JONG, 2017).

Conforme o Operador Nacional do Sistema Elétrico (2017), de 2005 a 2007, a geração hídrica doméstica respondia por mais de 87% da eletricidade do NE, mas em 2016 ela caiu para apenas 25%, ficando outros 25% com a geração termelétrica, 30% com a eólica e 20% com a energia importada, cenário que inspira otimização. De Jong (2017) sinaliza que, no NE, se a geração eólica de energia substituir a termelétrica, até 2020, os custos nivelados de geração de eletricidade cairão em cerca de 46% e as emissões de CO₂ equivalente diminuirão fortemente. Combinações de tecnologias para aquecimento de água têm também se mostrado promissoras (PEREIRA, DOS SANTOS, 2015). Esta crise e transição local apenas acentua os imbricados aspectos do uso da água e energia.

Trocas ou alternâncias do uso de resistência no chuveiro com opções alternativas têm sido uma tendência. Emergentes como a China têm registrado que, nas últimas décadas, a aspiração por qualidade de vida aumentou o uso de água quente e, com ele, o de energia, pelo que hoje estão se voltando ao uso da captação eólica, hídrica, fotovoltaica, SAS e SHPS para mitigar perdas da Opção 1 - ChE (CHOW; FONG; PEI; JI; HE, 2010; LUO, TANG, LIU, WANG, 2005).

Na Austrália, o uso de eletricidade para aquecer água representa mais de 40% do consumo energético de um lar típico, e na Inglaterra em torno de 50%, do que têm precisado pesquisar SAS e SHPS (LU AYE; CHARTERS; CHAICHANA, 2002). Nos EUA, mesmo com apenas 40% das suas casas usando a eletricidade para aquecer água (pois usam fontes fósseis como o gás, carvão, óleo), este aquecimento ainda representa, em média, 17% do consumo energético residencial e é o terceiro maior custo elétrico dos lares, percentagem que chega a 25% em estados como a Califórnia. Por outro lado, em estados como a Flórida, a opção do aquecimento elétrico da água é seguido por mais de 80% das casas (HEPBASLI; KALINCI, 2009). Estimou-se que os estadunidenses usam mais de 120 GWh/ano para aquecer água com eletricidade e que os SAS nos telhados das casas e terraços poderiam reduzir este consumo de 50% a 85% (CASSARD; DENHOLM; ONG, 2011).

Estes dados preocupam e estão entre as razões pelas quais os SAS e SHPS atraem oriente e ocidente (KALOGIROU, 2009; HALAWA; CHANG; YOSHINAGA, 2015). Suas maiores ecoeficiências somam-se a estas razões, cumulativamente, fazendo transitar as perspectivas econômicas unifamiliares de curto prazo às socioambientais nacionais e globais de longo prazo.

É de se esperar que as nações que usem do planejamento energético fomentem soluções prediais coletivas (por seus ganhos de escala) e não por domicílio e que outros países ainda recorram por algum tempo às soluções por unidades familiares, até que as circunstâncias ensejem agregá-las. Assim, a presente análise focou o usuário individual dos sistemas opcionais face à ausência de políticas federais nítidas de fomento dos mesmos na modalidade coletiva.

Existem iniciativas federais de aparelhamento individual de moradias populares com a Opção 2 – SAS-C pelo Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV), que vêm beneficiando 224 mil famílias com economias em torno de 30% de energia (BRASIL, 2017). Quanto às subunidades da federação, projetos de lei estaduais e municipais de indução do uso das alternativas

individuais são uma nova dinâmica regulatória das vantagens do aquecimento não-elétrico da água (WGSOL, 2018).

Nos últimos dez anos a cidade de São Paulo, e.g., converteu-se em uma referência legal no país, após tornar obrigatória a instalação do SAS nas novas edificações destinadas às categorias de uso residencial e não-residencial, através da Lei nº 14.459, regulamentada em 2008, que determinou, ainda, que as novas instalações hidráulicas e SAS deverão ser dimensionados para atender, no mínimo, a 40% (quarenta por cento) de toda a demanda anual de energia necessária à maior metrópole do país para o aquecimento de água sanitária e água de piscinas das novas edificações (SÃO PAULO, 2008), e o ideal chega a 70%. Mas a lei é restrita ao município e não induz a instalação do SAS nas edificações já existentes, exceto as que usem piscinas aquecidas, nem apresenta alternativas à questão do sombreamento. Mesmo para novas unidades, o SAS só é obrigatório se, no local de implantação dos coletores, a sombra (s) das edificações e/ou obstáculos externos existentes for inferior a 30% nos horários de referência de 9h, 12h e 15h, cabendo ajustes se $30\% > s < 60\%$ e inviabilizando a implantação se $s > 60\%$ em qualquer dos horários, quando a lei podia indicar testes de viabilidade de sistemas opcionais.

Por outras razões, no PMCMV só uma parte das unidades são assistidas por SAS-C e as demais têm respondido por um incremento da demanda por banhos com água aquecida eletricamente. Este crescimento foi ainda mais amplo pela inclusão, entre os usuários de eletricidade, de mais de três milhões de famílias (cerca de 15,3 milhões de pessoas, até novembro de 2015) pelo Programa Luz para Todos, criado em 2003 e prorrogado até 2018 (BRASIL, 2015b), implicando em quantidade de aquecimentos elétricos antes inexistente, à parte os novos prédios.

Os cenários global e local, portanto, sugerem i) opções ao ChE, ii) ganhos individuais e os de escala, iii) teste de alternativas quando limites operacionais locais de uma delas a inviabilizem.

1.3.2 SAS Convencionais: eficácia e barreira à entrada

A opção do SAS Convencional (SAS-C) pode ser sumariamente descrita como um sistema em regime de termossifão passivo (TP), industrializado, de tubulações de cobre sobre placas metálicas pretas, com isolamento térmico, protegidas em caixa de alumínio e vidro conectada a reservatório térmico metálico com termostato e resistência auxiliar.

O SAS-C de referência para a presente discussão envolve um Coletor Solar (2,00 m², vertical) desenvolvido com materiais nobres como o cobre e o alumínio e é produzido através de um processo intensamente automatizado, que possibilita produção em escala com alta padronização. Sua caixa externa tem perfis estruturados, com poucas partes móveis, oferecendo melhor resistência mecânica, evitando danos ao produto quando do transporte e instalação. Tem um sistema de fechamento com cantoneiras termoplásticas que permite a montagem do coletor sem a utilização de rebites ou parafusos, garantindo sua vedação total e maior durabilidade. Na parte superior do coletor, há a cobertura de vidros lisos, vedados com silicone contra chuva e poeira. No interior do coletor há aletas de captação, em alumínio, e revestidas de pintura especial que aumentam a absorção dos raios solares. Nas aletas está fixada a tubulação interna do coletor, de cobre, que tem alta capacidade de condução de calor. Entre o conjunto de tubulação, as aletas e a parte inferior da caixa, há um isolamento térmico ecológico, feito de poliuretano sem clorofluorcarbonetos (CFC).

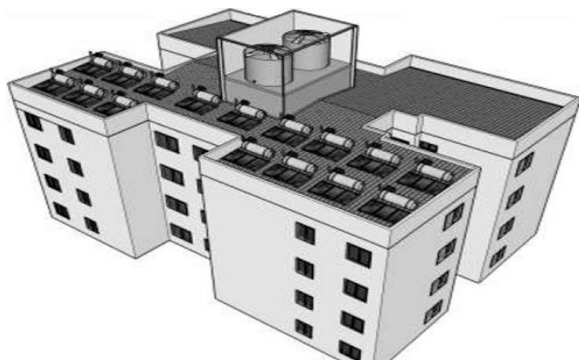
Quanto ao reservatório, seu corpo interno, com capacidade para armazenar 400 L de água quente, é de aço inoxidável, que resiste à corrosão e suporta pressões de até 0,5 bar. Possui isolamento térmico feito também de poliuretano sem CFC. Tem capa externa de alumínio corrugado e armazena água à temperatura média anual de 55°C.

Estes SAS-C geralmente oferecem a opção de um sistema complementar elétrico de aquecimento para dias em que a intensidade dos raios solares não é suficiente para aquecer a água. Um dispositivo permite que a família monitore a temperatura da água em seu interior e acione, de modo automático ou manual, a resistência elétrica. Modelos nacionais já oferecem um controlador digital de temperatura.

Por fim, cabe observar, quanto ao reconhecimento da eficiência deste SAS-C, a seguir orçado a preço de mercado de junho de 2017, que ele foi testado e aprovado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) e carrega o selo do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) (INMETRO, 2017). Tais parâmetros foram obtidos junto a este órgão e ao fornecedor Hidraushop Materiais Hidráulicos e Aquecedores em julho de 2017. Qualificado, resta averiguar os custos de produção, que ainda inibem sua aquisição e instalação mais amplas. Economias de escala tendem a advir com a demanda ampliada futura.

Comercialmente existem os chamados Aquecedores Solares Individuais a Conjuntos Verticais, caracterizados pela medição individualizada das redes de água fria e quente a cada apartamento, dotado com um SAS-C particular (Fig. 2). O SAS-C coletivo é usado, e.g., em hotéis (Fig. 3).

Figura 2 – SAS-C individuais para conjuntos verticais



Fonte: Soletrol (2018).



Fonte: WGSOL (2018).

Figura 3 - SAS-C coletivo em hotel (Salvador-Ba)



Fonte: Soletrol (2018).

Embora promissor, o viés de queda dos custos dos sistemas solares convencionais de aquecimento de água, no novo milênio, tem sido insatisfatório. Voltando no tempo, em Campinas/SP, em 2001, 2003 e 2005, os preços de sistema deste tipo, para atender a famílias

de 4 a 5 pessoas², variavam entre R\$ 2 202,00 (US\$ 739,00) e R\$ 2 700,00 (US\$ 906,00) (FANTINELLI, 2006, p. 161) com a cotação do dólar, em 06/2001, a R\$ 2,48³. No câmbio de julho de 2017 variaria de R\$ 2 372,19 a R\$ 2 908,26.

Tabela 1.1 - Custo do equipamento e conexões

Quant.	Unid.	Descrição	Valor Unitário	Subtotal
1	UN	Reservatório Térmico de Nível - Inox 400 litros	2 029,00	2 029,00
2	UN	Coletor Solar (Placa) - 2,00 m ² Vertical	906,00	1 812,00
1	UN	Kit Hidráulico de Instalação para residências	1 298,00	1 298,00
Total dos Produtos				5 139,00

Fonte: Hidraushop Materiais Hidráulicos e Aquecedores. Orçamento de julho de 2017.

Hoje (Tab. 1.1), um sistema mais ecoeficiente em inox com controle digital, com uma placa coletora de 2 m², está sendo ofertado por R\$ 2 935,00 e, com duas placas de 2 m², por R\$ 3 841,00. Resta incluir nestes custos iniciais a conexão do reservatório no terraço ao apartamento e o custo da mão-de-obra da instalação que, em 2003, chegou a US\$ 134, o que hoje valeria R\$ 430,14, mas, dado o viés de queda dos preços do trabalho, pode-se adotar R\$ 400,00. O investimento no SAS Convencional é, pois, com a conexão complementar e a instalação, de R\$ 5 539,00. O valor deste investimento inicial tem sido uma barreira à adoção desta opção no Brasil e Bahia. Como estes valores dependem das dimensões do SAS e delas depende sua eficiência local a padrões regulados, elas foram objetos de estudos de otimização.

1.3.3 Os ASBC: manufatura e quebra da barreira à entrada

Breve retrospecto do tipo de opção de baixo custo aqui discutido, na feira industrial da ECO 92 um protótipo brasileiro de ASBC foi publicamente apresentado e teve seu desenvolvimento acelerado até 1998, visando convertê-lo em um projeto de aplicação nacional. Em 1999 este sistema agregou-se ao Centro Incubador de Empresas Tecnológicas (CIETEC) da USP/IPEN e o primeiro resultado definitivo foi apresentado e disponibilizado à população brasileira, como tecnologia livre, no final de 2001, bem como a todos os países do mundo (CIETEC, 2009), opção atualmente certificada pelo Banco de Tecnologias Sociais da Fundação Banco do Brasil

² SAS com reservatório de até 500 L, coletores de 3,8 a 6,5 m², orçado junto a 11 fabricantes e distribuidores (FANTINELLI, 2006).

³ A cotação do dólar em 12 de julho de 2017 foi de R\$ 3,21.

e usada pelo Banco de Tecnologias da Fundação Getúlio Vargas, Observatório pela Tecnologia Social na América Latina, Rede de Tecnologias Sociais/Governo Federal (RTS) e outros entes.

Esquemáticamente, trata-se de um projeto para aquecimento de 200 L de água destinada à demanda de uma família de 4 a 6 pessoas, composto por quatro partes fundamentais: 1- Reservatório; 2- Coletores (pintados com tintas de cor escura à base de poliéster, acrílico ou epóxi, para melhor absorção de radiação solar); 3- Chuveiro elétrico com misturador e *dimmer* de apoio térmico e 4- Sistema geral de tubos. Como se destina a construtores não-especializados, algumas orientações técnicas o acompanham, como as de que os coletores operando no hemisfério Sul (caso do Brasil e Bahia) devem ser orientados para o norte e inclinados a um ângulo que compense a variação anual da declinação solar, que deve manter-se a mais perpendicular possível.

Cabe considerar que, se o investimento inicial requerido pelo SAS convencional colide com a restrição orçamentária de grande parte dos seus potenciais usuários, os ASBC exigem serem construídos, ainda que não seja considerada uma oficina difícil. Superadas estas dificuldades, em ambos os casos subsistem questões como da necessidade de sistemas de aquecimento auxiliares, bem como dos sistemas de controle das temperaturas desejadas para diversos usos. Neste último caso, o recomendável é, já quando da construção do imóvel, instalar a alimentação do chuveiro (e outras saídas) com conexões em ‘Y’ para vazões de água fria/quente sob controle de registros reguladores da mescla.

Esta é uma das principais críticas aos SAS convencionais e aos ASCB, pois, de fato, a máxima temperatura do fluido disponível ao usuário é obtida à medida que a taxa mássica de consumo diminui. Isto ocorre porque, inerte, é maior a estratificação de fluido quente na parte superior do reservatório, minimizando a mistura entre o fluido no topo e no fundo do tanque (BORGES, 2000). Além disto, ao longo do consumo, o tanque volta a ser preenchido com água fria, baixando a temperatura do sistema e exigindo, do usuário, especialmente no banho, regulagens para preservação do conforto térmico, até ser necessário reaquecer. A. Petrucci e E. Ioshimoto criaram modelos preditivos do comportamento de aquecedores de acumulação em sistemas prediais de água aquecida (PETRUCCI; IOSHIMOTO, 2002). Em um experimento, estimou-se uma queda de 17°C de temperatura dos SAS com o uso ao longo de banhos (Tab. 1.2).

Tabela 1.2 - Variação da temperatura do reservatório com o Método de Petrucci

Instante	Reservatório de 200 L	
	Massa de Água quente usada no banho anterior / (kg)	Temperatura da água no reservatório / (°C)
Antes do Banho 1	00,0	50,6
Antes do Banho 2	33,5	46,3
Antes do Banho 3	38,0	42,1
Antes do Banho 4	43,9	38,0
Antes do Banho 5	51,9	33,9

Fonte: Adaptação dos autores com base em Lima (2003).

Quanto aos custos de cada ASBC, em função das opções construtivas, materiais usados, falhas de mercados, os preços finais podem diferir sensivelmente de uma localidade a outra, variando ainda seu ciclo de vida (CV), sem garantia.

Tabela 1.3 - Custos de um ASBC

Componente	Quantidade	Preço
Placa Coletora (2 m ²)	2	R\$ 140,00
Reservatório (200 L)	1	R\$ 160,00
Custo Total		R\$ 300,00

Fonte: De Oliveira (2011).

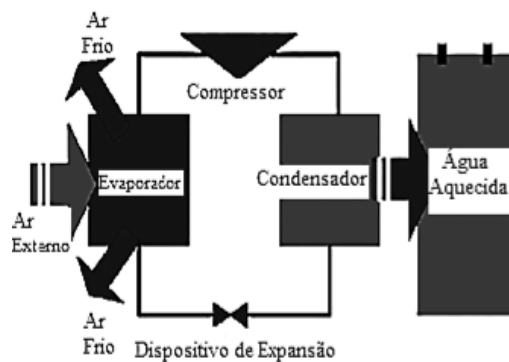
Estudo de engenharia da energia chegou aos valores da Tab. 1.3 (DE OLIVEIRA, 2011). Resta aqui agregar um elemento do custo de produção, a confecção manual, não-pago, mas dispendido, estimado em R\$ 350,00 (PEREIRA; DOS SANTOS, 2015), gerando valor total compatível com o custo de \cong 10% do SAS convencional. Adicionando-se o custo orçado de instalação e conexão do ASBC até a unidade predial como R\$ 150,00, o total sobe a R\$ 800,00.

1.3.4 As bombas de calor como potencial futura opção

O SHPS (Fig. 4) opera em ciclo de compressão elétrica de vapor e bombeia energia do ar circundante para aquecer a água do tanque reservatório (HEPBASLI; KALINCI, 2009). Com CV de 20 anos, gera ar-resfriado ao aquecer a água, usando os mesmos princípios mecânicos das geladeiras e aparelhos de ar-condicionado, mas em sentido contrário, por sua *bomba*, que expande e condensa um fluido para absorver o calor.

Este sistema passou a ser estudado com mais intensidade a partir da década de 1950, em sua estrutura, termodinâmica, fluidos de trabalho, controle de operação, análise econômica e simulação numérica (TANG, LIU, WANG, 2005; KIM et al., 2004; KARA; ULGEN; HEPBASLI, 2008; LAIPRADIT et al., 2008), mas o conceito da “Bomba de Calor” é creditado a W. Thomson, que não dispôs de meios para construí-lo, cabendo a T. Haldane o registro da primeira patente de um SHPS, em 1927. Industrializou-se em 1950, declinou em 1960 e reagiu nos anos 1970, face à alta do custo de energia, e hoje há de vários tipos (HEPBASLI; KALINCI, 2009).

Figura 4 - Esquema genérico dos SHPS ar-água



Fonte: Adaptado de Hepbasli e Kalinci (2009).

Os principais modelos puros de SHPS são os Ground-Source Heat Pump (GSHP) e o Air-Source Heat Pump (ASHP), sendo o primeiro 20% mais eficiente que o segundo ao enfrentar baixas temperaturas (Id., Ibid), mas o ASHP é o mais popular, pois no verão é um ar-condicionado e no inverno um aquecedor; e há os SHPS híbridos, com energia solar (Direct-Expansion Solar-Assisted Heat Pump - DX-SAHPs) (STARKE, 2013; STERLING, 2011; STERLING, COLLINS, 2012) ou com gás (Gas Engine Driven Heat Pump - GEHP), além dos SHPS tipo *flex* (LU AYE; CHARTERS; CHAICHANA, 2002; HEPBASLI; KALINCI, 2009).

Os SHPS tem CV 50% menor que os SAS. O ASHP e o SHPS unitariamente custam, onde são produzidos em maior escala, e.g., na Austrália, 56% e 71% da unidade da opção 2, respectivamente (Tab. 1.4).

Tabela 1.4 - Custos internacionais iniciais comparados das Opções 2 – SAS-C, 4a – SHPS e 4b - ASHP

	Air Source Heat Pump (ASHP)	SHPS	SAS Convencional
Custo unitário	R\$ 4 940,00	R\$ 6 273,80	R\$ 8 817,90
Custo de instalação	R\$ 494,00	R\$ 617,50	R\$ 864,50

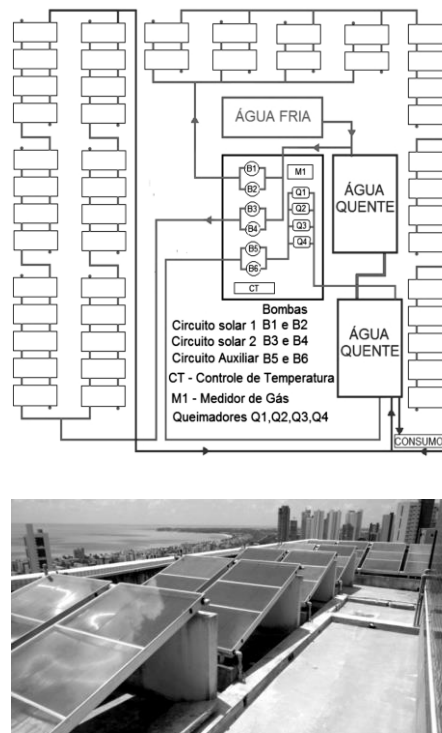
Fonte: Adaptação dos autores com base em SEA (2000) à cotação do dólar australiano comercial = R\$ 2.47 (10 de outubro de 2017).

Opções inversas (sistemas de aquecimento solar assistidos por bombas de calor) também têm sido experimentadas, como nos 19 testes realizados com um sistema híbrido composto por um coletor solar cilindro parabólico, em Florianópolis (SC, Brasil), exibindo resultados para a eficiência global do coletor entre 0,3 e 0,55, com incertezas de até 50%, mas na maioria dos testes realizados ela manteve-se em torno de 7% (PIGOZZO FILHO, 2013). Tais combinações das opções geram numerosas possibilidades com desempenhos superiores às opções puras, merecendo estudos crescentes de adaptação às condições de clima e preços locais.

1.3.5 Rentabilidade dos SAS prediais híbridos

Na planta, à parte superior da Fig. 5, está representado um SAS predial, registrado nas fotos abaixo dela, com coletores convencionais e sistema auxiliar de aquecimento a gás GLP. Neste SAS dois circuitos solares são amparados por queimadores. Estes entram em operação apenas quando os SAS são incipientes. A quase plena autonomia face à rede elétrica é economia atrativa, mas o impacto desta combustão inspira a opção 4 com os SHPS. Antes de examiná-lo, cabe adicionar que, após monitoramento e investigações, Medeiros et al. (2015) concluíram que este SAS mostra fração solar e eficiência energética dentro da faixa recomendada aos sistemas prediais do NE brasileiro, sendo capazes de ofertar-lhes água aquecida ao longo de todo o ano. Demais, comprovaram que este SAS é economicamente viável, mesmo se tratado como investimento de capital, pois apresentou um valor presente líquido (VPL) positivo de R\$ 174 175,87, com taxa interna de retorno (TIR) de 18,93%, superior à taxa de atratividade (5,9%), e *Payback* de 7,8 anos, mas com CV de 20 anos, ao cabo dos quais o fluxo de caixa, de R\$ 100 000 negativos iniciais (implantação), passa a positivo de R\$ 470 965,45.

Figura 5 - SAS predial com Gás GLP



Fonte: Medeiros et al. (2014).

Também Oliveira (2011) havia simulado o funcionamento de um SAS predial, para um hotel no NE, com sistema auxiliar de Gás, também aferindo VPL positivo, TIR superior à taxa de atratividade e *Payback* menor que 8 anos para CV de 20 anos. Coelho (2011) propôs um SAS predial a Gás com *Payback* de apenas 3 anos. Mas um SAS predial, cuja função é otimizar a utilidade total, não precisa ser lucrativo, e nem tanto assim, já tendo fins socioambientais, cujas externalidades positivas são nítidas. Mas duas fragilidades do SAS predial foram identificadas:

- i) o sistema de monitoramento e controle automático das temperaturas do SAS e a quantificação de água quente e GLP requerem melhorias para minimizar perdas;
- ii) é escassa a mão de obra treinada/especializada a sua operação e manutenção (MEDEIROS et al., 2014).

Será necessário superar ambas. O Programa de Qualificação de Fornecedores de SAS (Selo Qualisol), convênio do Inmetro com o Procel, responde parte da última questão, certificando

equipes que trabalham com maior qualidade, desde os fabricantes/fornecedores aos revendedores, instaladores, projetistas e equipes de manutenção (ABRAVA, 2018).

1.4 PARÂMETROS DA UNIDADE USUÁRIA DE SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

1.4.1 Perfil da demanda de água a custos vigentes

Aqui será considerada uma unidade predial unifamiliar de consumo tipo intermediária, a seguir tipificada, na qual uma família com quatro pessoas tome três banhos por dia, de seis minutos cada, com chuveiro padrão e registro meio-aberto (5 L/minuto), que perfazem o consumo diário de 360 L, que equivale a cerca de 11 m³/mês, considerando-se, por aproximação, o mês como de 30 dias. Como requisito de operação das opções de aquecimento, todas devem ser capazes de ofertar água à habitação à temperatura mínima de 40°C, padrão retirado da análise empírica de L. Souza e J. Bezerra (2000), que pode ser alterado, conforme o perfil da unidade.

Parte-se da situação-problema⁴ na qual alguns segundos de vazão de água são desperdiçados a cada ato de banho individual, à espera da água aquecida por um SAS energeticamente eficiente e autônomo em relação à rede pública de oferta de energia, instalado no terraço, face à alternativa de aquecimento por resistência elétrica instalada diretamente no chuveiro, dependente do sistema de oferta da cidade, mas sem desperdício de água. Como equacionar? O primeiro ato é calcular o desperdício médio de água dos SAS, para dado perfil da demanda, embora possa ser mitigado ou anulado com o uso de certas técnicas e usos, por fim discutidos. Sua estimativa indicará um cenário imprevidente, que pode e deverá mudar (BOSCOLI, 2010).

A quantidade média de água limpa eventualmente desperdiçada à espera da chegada da água quente vinda do Reservatório Térmico de Nível, guarda relação linear com a altura da coluna, salvo ela sofra constante entrada de ar e tenha diâmetro interno mínimo menor que 5 mm, hipóteses descartadas nos sistemas hidráulicos prediais em exame (SANTOS; CEOLIN; ALBUQUERQUE; RICHTER, 2007). Considera-se nesta simulação que a coluna média de

⁴ Esta situação-problema foi originalmente proposta em julho de 2017 pelo professor e pesquisador Asher Kiperstok como estímulo à reflexão nos cursos interconexos de Prevenção à Poluição e Ecologia Industrial do PEI-UFBA na graduação, mestrado e doutorado.

água (t) tenha 18 m (cerca de seis andares abaixo do terraço, medial em prédios de 10 a 15 andares), com tubulação padrão de 9,5 mm de raio interno, parâmetros variáveis para cada caso.

Os critérios para faturamento da Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A - Embasa formam a Tab. 1.5. Os usuários deste caso enquadram-se à faixa “Residencial Intermediária”. A Tab. 1.6 computa os gastos brutos com água das três opções, considerando desperdícios e preferências imediatistas, e os de energia, considerando o chuveiro mais encontrado no mercado, com 5 500 W no máximo e 3 500 W no médio (valor adotado no presente estudo), com custo de R\$ 0,624/kWh de Consumo Ativo, preço aplicado na Bahia pela Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia - Coelba⁵ (outubro de 2017).

Tabela 1.5 - Preço pago pelo consumidor no Estado da Bahia conforme volume e unidade de uso da água – em R\$

Faixas de Consumos	Residencial Social	Residencial Intermediária*	Residencial/ Normal/ Veraneio	Filantrópica
I. Até 6 m ³ (Mínima)	R\$ 12,30 p/ mês	R\$ 24,20 p/ mês	R\$ 27,50 p/ mês	R\$ 12,30 p/ mês
II. 7 a 10 m ³	R\$ 0,76 p/ m ³	R\$ 0,98 p/ m ³	R\$ 1,09 p/ m ³	R\$ 0,76 p/ m ³
III. 11 a 15 m ³	R\$ 5,42 p/ m ³	R\$ 6,23 p/ m ³	R\$ 7,68 p/ m ³	R\$ 5,42 p/ m ³
IV. 16 a 20 m ³	R\$ 5,90 p/ m ³	R\$ 6,73 p/ m ³	R\$ 8,22 p/ m ³	R\$ 5,90 p/ m ³
V. 21 a 25 m ³	R\$ 8,80 p/ m ³	R\$ 8,84 p/ m ³	R\$ 9,24 p/ m ³	R\$ 8,80 p/ m ³

Fonte: BAHIA, 2017a.

*Área construída $\leq 60\text{m}^2$, no máximo 2 banheiros e 8 pontos de utilização da água, sem piscina. Padrão Coelba mono ou bifásico.

Tabela 1.6 - Padrões de consumo e despesas mensais com água na Bahia.

	α_n	β_n	λ_n	μ_n	δ_n	ρ_n	σ_n
OPÇÃO (n)	Desperdício / (m ³)	Consumo Útil / (m ³)	Volume Total / (m ³)	Preço – Faixa / R\$ / (m ³)	Custo Fixo / R\$ (até 6m ³)	Custo Variável / R\$	Custo Total / R\$
1 - ChE	0,00	10,8	10,80	6,73	24,2	56,50	80,70
2 - SAS Convencional	1,84	10,8	12,64	6,73	24,2	68,86	93,06
3a - ASBC-PVC	1,84	10,8	12,64	6,73	24,2	68,86	93,06
3b - ASBC-PP	1,84	10,8	12,64	6,73	24,2	68,86	93,06
4a – SHPS Aquecedor	0,00	10,8	10,80	6,73	24,2	56,50	80,70
4b – SHPS Flex	0,00	10,8	10,80	6,73	24,2	56,50	80,70

Fonte: Elaboração do autor com dados de Bahia (2017a, 2017b).

⁵ A firma oferta energia a 5,8 milhões de clientes na Bahia (88% residenciais) atendendo a 415 dos 417 municípios do estado.

Note-se que na Tab. 1.6 os valores de desperdício das opções $n_{1(\text{ChE})}$, $n_{4a(\text{SHPS Aquecedor})}$ e $n_{4b(\text{SHPS Flex})}$ são zerados, situação ideal onde não há vazamentos e a oferta de água a 40°C é instantânea. As incógnitas μ_n e δ_n têm valores predefinidos pelo ambiente econômico dos casos estudados.

Explicitando os demais procedimentos de cálculo das variáveis da Tab. 1.6, de início, tem-se

$$\alpha_n = \pi \cdot r^2 \cdot d_n \quad (1)$$

em que d_n é o comprimento da tubulação onde a água fria está armazenada e r é o seu raio interno. Com os dados predefinidos, o volume (α_n) de água fria escoada antes da aquecida é $0,005104 \text{ m}^3 \approx 5,1 \text{ L/banho} = 1,836 \text{ m}^3/\text{mês}$ por família, para as opções 2 (SAS), 3a (ASBC-PVC) e 3b (ASBC-PP). Foram predefinidos ainda os dados do consumo hídrico útil (β_n) = 10,8 $\text{m}^3/\text{mês}$ para qualquer opção:

$$\beta_n = (pb)(vt)30 \quad (2)$$

onde p é o número de membros da família (4), b é o número médio de banhos diários (3), v é a vazão do chuveiro padrão e registro meio-aberto (5L/min) e t é o tempo médio do banho (6 min). Decorre destas premissas o volume total de água consumida no mês de forma útil e desperdiçada $\lambda_n = \alpha_n + \beta_n$.

Ao valor de μ_n foi atribuído o preço da Faixa IV da Tab. 1.5, pois é necessário considerar que se somam a λ_n os usos mínimos de água no domicílio, estimados em 4,4 m^3 (Tab. 1.7), totalizando 15 $\text{m}^3/\text{mês}$, e que estes padrões estão abaixo de média oscilante de 16 até 20 $\text{m}^3/\text{mês}$.

Tabela 1.7 - Patamar de consumo mínimo recomendado no NE

USOS	Mínimo Recomendado / (L/dia/pessoa)	Mínimo para Família de 4 Pessoas / ($\text{m}^3/\text{mês}$)
Água para ingestão*	5	0,6
Serviços sanitários**	20	2,4
Banho	90	10,8
Alimentos e cozinha	10	1,2
TOTAL	125	15

Fonte: Elaboração dos autores com base em Gleick (1996) e Garcia (2011).

* Mínimo para garantir a vida em condições climáticas moderadas e níveis de atividade média.

Além da taxa fixa mensal há o custo variável ρ_n , que passa a existir se $\lambda_n > 6\text{m}^3$, de modo que

$$\rho_n = (\lambda_n - 6) \mu_n \quad (3)$$

O custo mensal total com água (σ_n) é $\mu_n + \delta_n$, implícitas as equações 2 e 3 ou, desagregadamente,

$$\sigma_n = \{[\pi \cdot r^2 \cdot d_n + (pb)(vt)30] - 6\} \mu_n + \delta_n \quad (4)$$

Antes de passar à descrição do perfil da demanda por eletricidade, interpõe-se a discussão metodológica e de experimentos sobre a eficiência energética dos sistemas, codeterminante do referido perfil, em conjunto com o patamar de preço vigente, bens substitutos e poder aquisitivo.

1.4.2 Experimentos de eficiência: métodos de cálculo

Embora não caiba aqui reproduzir completamente as metodologias e processos de cálculo que sustentam os resultados dos experimentos a seguir revistos, suas equações de eficiência merecem ser explicitadas pois fundamentam as análises conjuntas que hierarquizarão as opções.

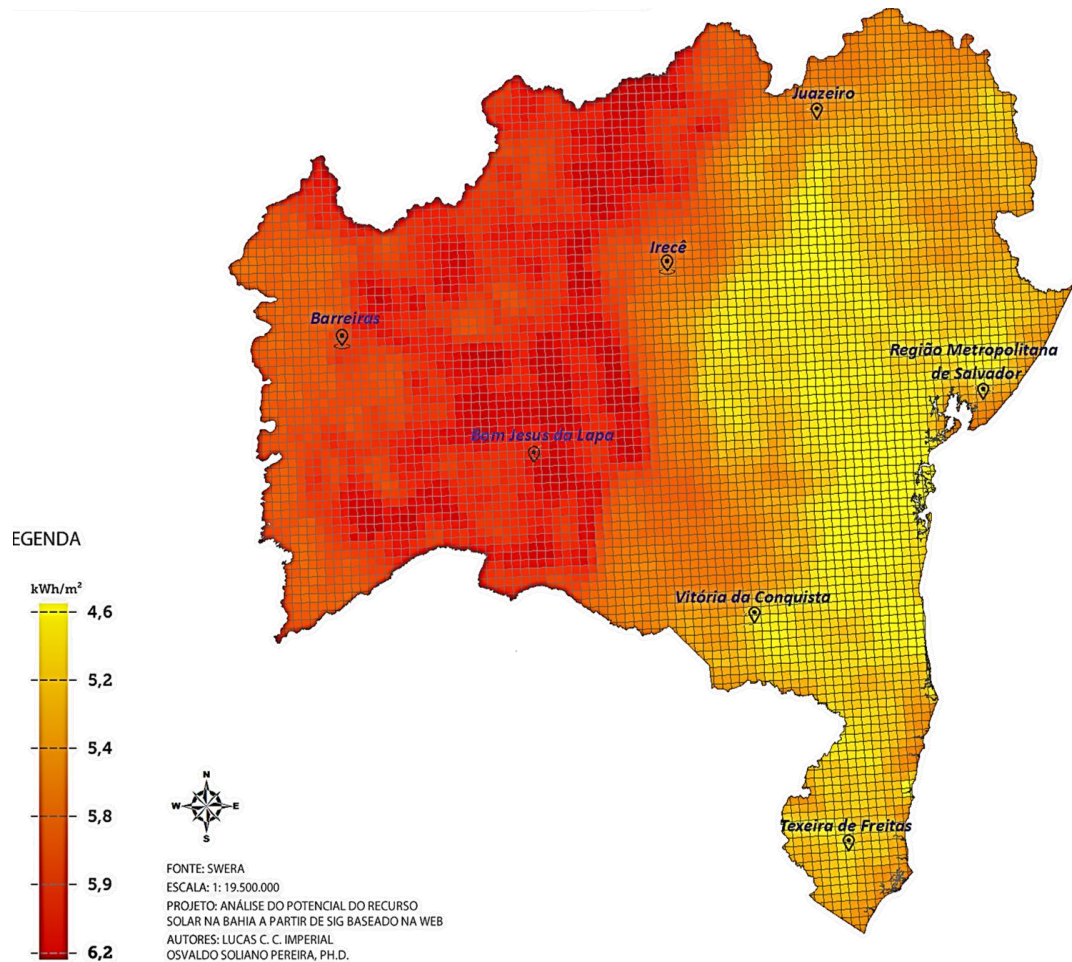
1.4.2.1 Chuveiro Elétrico e Resistência Auxiliar

A equação de eficiência (η) energética da Opção 1- Chuveiro elétrico, bem como da resistência elétrica auxiliar do SAS (modo de aquecimento de passagem, externo ao RT), é definida por

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_0 - T_1)}{Q_r} \quad (5)$$

onde \dot{m} é fluxo de massa da água, c_p é o calor específico do fluido, T_0 e T_1 são, respectivamente, a temperatura de saída e entrada da água no chuveiro/reservatório e Q_r é a taxa de transferência do calor adquirido pela resistência (PASSOS, 2011). Adiante-se que o grau de uso do sistema auxiliar varia, para os SAS, à proporção inversa da intensidade da irradiação solar local (Fig. 6), questão ora só pontuada, mas discutida à seção 1.5 deste estudo.

Figura 6 - Irradiação Solar na Bahia - Média Anual



Fonte: Imperial e Pereira (2014).

1.4.2.2 Sistema de Aquecimento Solar (SAS)

A equação de eficiência (η) de um SAS depende dos materiais empregados na sua construção, adequada instalação e design e, conforme os estudos pioneiros de Hottel e Whillier (1959), pode ser definida como a razão entre ganho útil de energia, sob um determinado período de tempo, pela energia que chega ao coletor neste período (BORGES, 2000). A η média do SAS é uma variável regulada pelo Inmetro via Portaria nº 301, de 14 de junho de 2012, definida na Eq. 6:

$$\eta_{m\acute{e}dia} = \left[\int_0^{x'} \eta(x) dx \right] x'^{-1} \quad (6)$$

onde x' é o limite superior de integração, estimado, dentro das condições de experimento definidas pelo Inmetro, em 0,044 para o SAS-C (coletor fechado) e 0,020 para os SAS não-convencionais (coletor aberto); a Eq. 7 define η :

$$n = F_R t a - F_R U_L \left(\frac{T_i - T_a}{I} \right) \quad (7)$$

onde F_R é o fator de remoção de calor do coletor, definido pela Eq. 8, t é a transmitância da cobertura de vidro, a é a absorvância da superfície da placa, U_L o coeficiente global de transferência de calor, T_i é a temperatura de entrada da água no coletor, T_a é a temperatura ambiente e I é a taxa de radiação solar incidente à superfície da placa coletora (STARKE, 2013).

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p (T_0 - T_1)}{A_c [S - U_L (T_i - T_a)]} \quad (8)$$

onde S é a radiação solar absorvida e A_c é a área da placa coletora (BORGES, 2000). Os experimentos de eficiência dos SAS em regime permanente consistem em apontar a placa coletora ao Sol, sob radiação direta, em incidência normal, submetê-la a vazão de água constante e determinar os elementos de F_R através de medições (DUFFIE; BECKMAN, 1991).

Figura 7 - Faixas de classificação para Coletor Solar e Sistemas Acoplados – aplicação banho (Anexo 3).

Faixas de Classificação Coletor Solar e Sistema Acoplado – Aplicação Banho	
Classe	Produção Específica Mensal / (kWh/(mês.m²))
A	80,3 < PME _e
B	73,3 < PME _e ≤ 80,3
C	66,3 < PME _e ≤ 73,3
D	59,3 < PME _e ≤ 66,3
E	52,3 < PME _e ≤ 59,3

Fonte: Inmetro (2012).

O Anexo 3 da referida Portaria nº 301 hierarquiza os SAS às faixas em que se enquadram (Fig. 7), para etiquetagem, conforme a sua produção específica de energia (PME_e), dada pela Eq. 9:

$$PME_e = \frac{P_{men}}{A_{ext}} = \frac{\left(\frac{30}{3600}\right) Q_u}{A_{ext}} \quad (9)$$

onde P_{men} é a produção mensal de energia, em kWh/mês, A_{ext} é a área externa do coletor, em m^2 , e Q_u é a energia útil diária, que, conforme a ISO 9459-2, deve ser obtida empiricamente.

1.4.2.3 Bombas de Calor (SHPS)

O coeficiente de desempenho (COP) de uma bomba de calor se dá pela Eq. 10, na forma da razão entre a potência térmica de aquecimento (Q_c), que é a taxa de calor trocado no condensador, e a potência elétrica consumida pelo equipamento ($W_{hp;ele}$) que é, para as SHPS água-água, igual à consumida pelo compressor ($W_{hp;ele} = W_{comp;ele}$), mas que, para o modelo ar-água, correspondente à eletricidade gasta pelo compressor ($W_{comp;ele}$) e pelo ventilador do evaporador ($W_{hp;ele} = W_{comp;ele} + W_{vent;ele}$), cujas potências podem variar para cada bomba (STARKE, 2013).

$$COP = \frac{Q_c}{W_{hp;ele}} = \frac{Q_c}{W_{comp;ele}} \text{ ou } \frac{Q_c}{(W_{comp;ele} + W_{vent;ele})} \quad (10)$$

A modelagem de funcionamento das bombas de calor é definida com um sistema de equações (Anexo A) dado pela literatura termodinâmica sobre ciclos de compressão de vapores (VANWYLEN et al., 2003; BEJAN, 2006), estruturada nestas cinco etapas (STARKE, 2013):

- 1° - o fluido de trabalho encontra-se no estado de vapor superaquecido à baixa pressão;
- 2° - o compressor eleva a pressão do fluido até a pressão do condensador no estado de vapor superaquecido;
- 3° - no condensador, o vapor superaquecido a alta pressão perde calor sensível até atingir o estado de vapor saturado, sob um processo de rejeição de calor à pressão constante;
- 4° - o vapor condensa até o estado de líquido saturado;

5° - no dispositivo de expansão, o fluido sofre um processo de expansão adiabática até a pressão do evaporador, sendo descarregado no estado de saturação.

A revisão de literatura de Hepbasli e Kalinci (2009) permitiu reunir as principais equações de balanço de energia e exergia para onze componentes das bomba de calor (Anexo B), usando notação similar à de Starke (2013) nas variáveis e só alguns subscritos ligeiramente distintos.

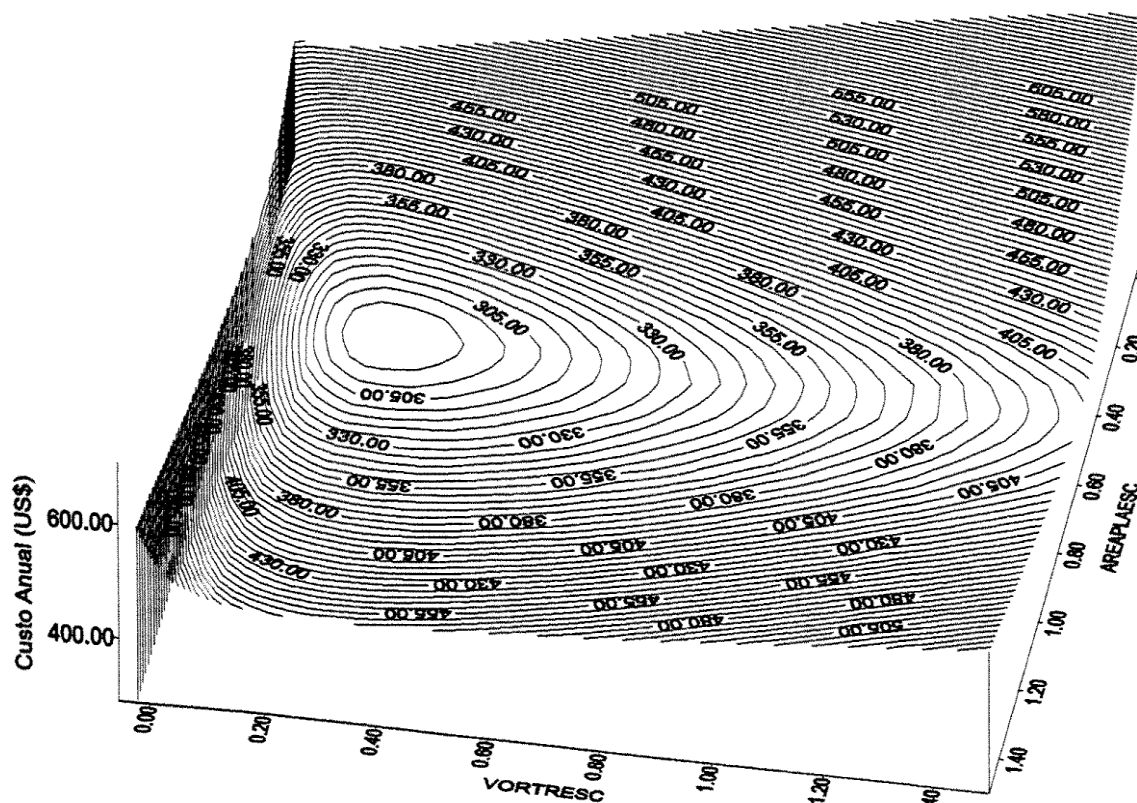
1.4.3 Experimentos de eficiência: testes dos sistemas

Valendo-se da modelização acima, na tese Síntese Otimizada de Sistemas de Aquecimento Solar de Água, Borges (2000) simulou dimensionamentos de um sistema de aquecimento solar de água capaz de determinar o ideal, a mínimo custo, ao longo da vida útil do equipamento, a partir de especificações iniciais e ajustes nestas. Note-se que o pesquisador teve o cuidado de levar em conta o investimento para a aquisição e manutenção do sistema, bem como com o grau de necessidade de uso de energia auxiliar face às condições climáticas do local de instalação.

Acoplando um procedimento de otimização não-linear a uma rotina de simulação numérica no longo prazo, em regime transiente, valeu-se do método dos Gradientes Conjugados para visualizar a busca do ótimo em uma superfície tridimensional (Fig. 8), com até sete variáveis dos projetos (área de placa coletora, volume de reservatório térmico e outras), do que o modelo de síntese proposto oferece soluções técnicas para as dimensões, a custo minimizado, adequadas às condições locais de funcionamento do SAS, em qualquer região intertropical, e.g., do Brasil.

Inferiu-se que o ponto ótimo da função objetivo, para o caso de sua análise (Campinas, SP), encontra-se nas proximidades das coordenadas $AREAPLAESC = 0,4$ [variável de decisão (V_d) relacionada à *área da placa coletora*] e $VOLRTEESC = 0,2$ [V_d relacionada ao *volume do reservatório*] correspondentes à f de US\$ 290,00 que corresponde à placa de $6,81 \text{ m}^2$ e ao reservatório de $0,28 \text{ m}^3$ ou 280 L. Calculou-se que, considerados sete fatores decisórios, e.g., as despesas totais anuais com a energia elétrica auxiliar e o volume do investimento inicial, os resultados acima passam, respectivamente, a $5,75 \text{ m}^2$ e $0,26 \text{ m}^3$. Esta modelagem deve ser adaptada a cada município, no Brasil ou do exterior, usando seus dados locais de clima e custos.

Figura 8 - Superfície gerada por uma malha de pontos da função custo anual (f).



Fonte: Borges (2000).

Porém, para Lima (2003) este estudo não considerou a perturbação das variáveis locais sobre as demais, e as tomou em condições ótimas, sendo dele o mérito de demonstrar a aplicabilidade da programação não-linear ao SAS. Esta autora também modelou uma otimização de SAS usando rotina de simulação numérica em regime transiente, mas de longo prazo, indicando a inclinação e a área da placa coletora que resultam no mínimo custo ao longo da vida útil do equipamento face às condições climáticas locais, perfil de demanda de água quente, orientação do coletor e a temperatura desejada para o armazenamento da água. Concluiu ela, por fim, que a energia elétrica auxiliar economizada com a introdução de um dispositivo tipo “timer” impacta o tempo e taxa de retorno do investimento, e tanto mais sensivelmente quanto menores sejam as tarifas locais de eletricidade.

Outros experimentos determinaram a melhor relação entre a área coletora e a capacidade do reservatório térmico, para qualquer localidade do Brasil, com sistemas ASBC feitos de materiais reciclados, constituídos por duas placas absorvedoras de PVC e um reservatório vertical de polipropileno (JURADO, 2004), otimizando entradas e saídas.

Considerando que os dados sobre a intensidade de radiação solar que atinge a placa coletora de um ASBC e a temperatura ambiente específicas de cada local são cruciais à determinação do desempenho da mesma (SIQUEIRA, 2009), no RN, realizaram-se novos experimentos (DE SOUZA, BEZERRA, 2000) com apoio da Eq. 11, conforme a modelização acima discutida:

$$Q_u = mc_p \Delta t \quad (11)$$

onde, vimos, Q_u é a quantidade de calor fornecida, em kW; m é a vazão mássica, em kg/s; c_p é o calor específico da água a pressão constante, $c_p = 4,18 \times 10^3$ kJ/(kg.°C), e ΔT é a variação entre a temperatura final e a inicial do fluido (10 °C), análise pela qual inferiu-se que, no RN, para aquecer o volume de 360 L/dia, são necessários 0,7 m²/pessoa de placa coletora (chamado de método direto), isto é, 2,8 m² para o caso em exame de 4 pessoas. Cada placa de tamanho usual tem, todavia, 2 m², indicando um superdimensionamento usando-se duas, que é preferível à insuficiência. Estes valores são compatíveis com a unidade familiar de referência neste estudo, no estado da Bahia. Observe-se, em comparação, que os valores encontrados por Borges (2000) são compreensivelmente maiores, face à irradiação e às variáveis climáticas de Campinas-SP.

Testes seguem sendo realizados como o que, na cidade de Mossoró – RN-NE, detectou que um destes modelos de ASBC, composto por um coletor solar plano e um reservatório térmico, operando em regime de convecção natural ou termossifão (adiante discutido), não é adequado para uso na cidade, pois atingiu ou ultrapassou, em algumas etapas da pesquisa, os *níveis críticos* de temperatura (maior que 60°C) para a degradação térmica de alguns dos materiais empregados, como os tubos paralelos de Policloreto de Vinilo (PVC) (GUERRA; VARELLA, 2014; LOPO, 2010).

Note-se que Mossoró se situa a 5° 11' 17" Sul, 37° 20' 39" Oeste, ficando 875 km mais próxima da linha do equador que a capital da Bahia, Salvador, principal município da área de abrangência deste estudo, sito a 12° 58' 13" Sul, 38° 30' 45" Oeste, mas que, se Salvador está menos exposta a *níveis críticos*, no centro-oeste do estado há o risco, pois a Bahia tem o maior índice de irradiação solar no plano inclinado do país (PEREIRA, MARTINS, ABREU, RÜTHER, 2006), com média anual máxima de 6,1 kWh/m², favorecendo a implantação de projetos de captação solar (CBEM, 2015), chegando a atingir 6,5 kWh/m² ao norte, próximo à fronteira com o estado do Piauí-NE, apresentando clima semiárido e baixa precipitação ao longo

do ano (aproximadamente 300 mm/ano), derivando a média anual de cobertura de nuvens mais baixa do Brasil⁶. Neste caso, a troca dos tubos de PVC pelos de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) foi testada, têm eficiência térmica satisfatória e é até mais barata (GOMES, 2010).

Figura 9 - Experimento na UFU com Sistemas de ASBC*



Fonte: Siqueira (2009).

* 1 – Coletor solar de forro de PVC: a – Entrada de água no coletor de PVC; b – Saída de água no coletor de PVC; 2 – Coletor solar de cobre: c – Entrada de água no coletor de cobre; d – Saída de água no coletor de cobre; 3 – Coletor solar de PP: e – Entrada de água no coletor de PP; f – Saída de água no coletor de PP; 4 – Reservatório de água fria (caixa d'água); 5 – Reservatório de água quente do coletor de PVC; 6 – Reservatório de água quente do coletor de cobre (Reservatório Convencional); 7 – Reservatório de água quente do coletor de PP.

Quatro experimentos computacionais com as especificações da Fig. 9, com uso de técnicas de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics*) e dos balanços de energia, conforme visto, permitiram prever o funcionamento contínuo dos sistemas, ajudando na compreensão de particularidades do escoamento dentro do sistema, realizados na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) para comparar os comportamentos de dois ASBC e um SAS

⁶ Para atlas com irradiação derivada de satélite, validada à superfície, ver Colle e Pereira (1998, 1999, 2000).

convencional (SIQUEIRA, 2009, p. 44-45), quais sejam: 1) Coletor Solar de Forro de PVC; 2) Coletor Solar de Cobre (Convencional); 3) Coletor Solar de Polipropileno (PP).

Os ensaios físicos de eficiência dos ASBC adotaram os procedimentos da NBR 10184 e mostraram que os modelos, comparados entre si, apresentaram valores muito próximos de aquecimento máximo e eficiência (Tab. 1.8), considerados ótimos desempenhos térmicos, emulando com os valores de eficiência e de temperatura atingidos pelo reservatório convencional, que os supera nos dois aspectos, mas com pequena diferença de °C para $T_{máx}$. Os experimentos demonstraram, ainda, que as eficiências dos ASBC podem aproximar-se mais do convencional quando não operam com a circulação natural da água (sistema em termossifão ou passivo), mas com bombeamento ativo a taxas de recirculação intermediárias em torno de 40 L/h, condição na qual o *Coletor Solar de Forro* de PVC pode atingir a eficiência de 50,3% e o *de Polipropileno* 48,2%.

Tabela 1.8 - Eficiência média dos sistemas ASBC e Convencional

Sistema de Aquecimento Solar	Eficiência (η)	Temperatura máxima ($T_{máx}$)
Opção 2 – SAS Convencional	50,9 %	45,0°C
Opção 3a - ASBC-PVC	47,1 %	43,2°C
Opção 3b - ASBC-PP	44,5 %	42,4°C

Fonte: Elaboração do autor, com base em Siqueira (2009).

Apurou-se que o melhor desempenho do sistema de PVC deve-se a que ele é mais sensível a mudanças de vazão, pois tem baixa inércia térmica, característica ligada à menor quantidade de dutos e maior área transversal, relativamente ao *de Polipropileno*. Se, por um lado, o bombeamento eleva a eficiência térmica do ASBC, exige energia e ela deve ser considerada. Analítica e funcionalmente bastam as N_t dos ASBC em termossifão. Conforme o Departamento Nacional de Energia Solar, no Brasil homens demandam, em média, água aquecida a 38/39 °C, mulheres a 40 °C (VIDA SUSTENTÁVEL, 2015), supridas pelas $T_{máx}$ de ambos os ASBC.

Análises comparativas dos SHPS com outros sistemas, a partir das modelizações para bombas de calor acima revistas, inferiram os dados da Tab. 1.9, considerando seus custos iniciais e CV.

Tabela 1.9 - Comparação experimental

Opções de Mais Alta Eficiência	Economia de Energia vs. Opção 1 - ChE	Melhores climas	Expectativa de poupanças de energia durante o CV / (US\$)	CV / (anos)	Principais vantagens
2 – SAS Convencional	70 a 90%	Temperado	Até 2 200	20	Maior economia e uso de energia solar
4a – SHPS Aquecedor	65%	Temperado	Até 900	10	Opção elétrica mais eficiente

Fonte: Adaptação dos autores com base Hepbasli e Kalinci (2009).

1.4.4 Perfil da demanda de eletricidade a custos vigentes

Nos dados da Tab. 1.10 a seguir estão consideradas as despesas de energia dos SAS na forma de uso de sistema auxiliar elétrico, em dias de menor irradiação, para garantir oferta d'água à 40°C. O percentual de participação deste uso na composição do gasto anual com o uso da opção 2 –SAS Convencional é de 23% (BORGES, 2000, p. 53), ficando os gastos com aquisição, instalação e manutenção do equipamento com os demais 77%. Naturalmente, esta proporção varia em função das condições climáticas e de sombreamento locais⁷. Nesta primeira aproximação, pressupõe-se inexistir problemas de sombreamento e uma exposição à irradiação média de 4,9 kWh/m² à cidade onde Borges estabeleceu a proporção (Campinas-SP), conforme o Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura e o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul calcularam (VILLALVA, 2010).

À parte das caracterizações de eficiência do sistema solar específico (tipo da placa etc.), para determinar a necessidade de uso da energia auxiliar, a rigor, haveria que considerar a irradiação solar local, temperatura, altitude, pressão atmosférica, umidade, pluviosidade e ventos, o que ele relatou ser um trabalho árduo que envolveria anos de coletas de dados e tratamento estatístico (BORGES, 2000). O caminho mais simples é o experimento. Neste sentido, cabe notar que um sistema de controle para a temperatura e vazão de banho de um chuveiro elétrico combinado com uma segunda entrada de água, oriunda de um SAS, usando Lógica Fuzzy (tipo SE <condição> ENTÃO <ação>), foi proposto no Centro Tecnológico da Universidade Federal

⁷ Detalhe, Borges tomou por base um SAS com um sistema auxiliar composto (formado por um aquecedor interno ao reservatório e outro externo, de passagem). Soma o gasto de energia de ambos na variável Q_{tot}. que é multiplicada pelo custo da energia vigente = 4,5818 .10⁻⁵ US\$ / kJ.

de Santa Catarina, de modo que um microcontrolador de oito bits realize a mistura das águas de entrada vindas da tubulação do SAS e da rede tradicional para o tambor do Chuveiro, a temperaturas e pressões diferentes, por meio de servoválvulas, para garantir que a vazão e a temperatura de saída sejam as desejadas pelo usuário (PILATTI, 2012), otimizando tanto o uso da energia elétrica auxiliar ao SAS, quanto da água. O resultado destes e doutros possíveis experimentos gerarão novas proporções finais entre o custo da energia auxiliar e o da aquisição, instalação e manutenção do equipamento. A razão 23/77 para um SAS-C, aferida por Borges, é um valor inicial empírico, passível de ajuste em face dos custos, eficiência, clima, caso a caso.

Considerando que a taxa de depreciação anual de um SAS-C é 5% (face a um CV de 20 anos) sobre os R\$ 5 139,00 orçados na Tab. 1.1; considerando que o custo anual com a manutenção é de 1% sobre o custo inicial (aquisição e instalação = R\$ 5 539,00 Cf. Tab. 1.1), elevando-se 6% ao ano (BORGES, 2000, p. 50), o custo com a energia auxiliar (w) é dado pela Tab. 1.10:

Tabela 1.10 - Dedução da despesa anual e mensal com sistema auxiliar do SAS-C / R\$

	x	Y	z	w
	Aquisição	Instalação	Manutenção	Energia Auxiliar
Anual	256,95	20,00	5,09	64,87
Mensal	21,41	1,67	0,42	5,41

Fonte: Elaboração do autor.

Explicitando os cálculos anuais: $x = 5\ 139d$, onde $d = 0,05$; $y = 400$ (ver seção 1.3.2) e

$$z = \frac{z_1 \frac{(q^{CV} - 1)}{(q - 1)}}{CV} \quad (12)$$

onde $z_1 = (x + y)m$ e $m = 0,01$, $q = (1 + r)$, $r = 0,06$, $cv = 20$ (anos), e, finalmente, emerge a Eq.12:

$$w = \frac{23(x + y + z)}{100} = \frac{23 \left(5\ 139d + 400 + \frac{z_1 \frac{[(1 + r)^{CV} - 1]}}{[(1 + r) - 1]}}{CV} \right)}{100} \quad (13)$$

1.5 HIERARQUIZAÇÃO: PRIMEIRO AJUSTE

A demanda por energia auxiliar das opções 3a - ASBC-PVC e 3b - ASBC-PP é inversamente proporcional às suas eficiências relativas, conforme a Tab. 1.8, ficando estimadas pela Tab. 1.11. Considerando que a Opção 4a – SHPS Aquecedor poupa 65% da energia consumida pela Opção 1 – ChE e que a Opção 4b – SHPS Flex chega a ser 20% menos eficiente que a 4a (em dias frios), as colunas ψ_n e τ_n da Tab. 1.11 podem ser completadas e, trazendo de volta a coluna σ_n da Tab. 1.6, ficam determinados os custos brutos totais por mês e os custos do banho individual, considerando o perfil da família.

Tabela 1.11 - Despesas mensais brutas com água e energia na Bahia e de custo do banho - Primeira Aproximação

OPÇÃO (n)	ENERGIA				ÁGUA		
	ϕ_n	ψ_n	τ_n	η_n	σ_n	Custo TOTAL / R\$	Custo do Banho / R\$
	Preço / R\$ / (kW·h)	Consumo / (kW·h)	Custo / R\$	Eficiência relativa ao ChE / $[(\tau_{\text{máx}} - \tau_n) / (\tau_{\text{máx}})]$	Custo / R\$		
1 - ChE	0,62	126,00	78,12	0,00%	80,70	158,8	0,44
2 - SAS Convencional	0,62	8,73	5,41	93,07%	93,06	98,5	0,27
3a - ASBC-PVC	0,62	9,43	5,85	92,51%	93,06	98,9	0,27
3b - ASBC-PP	0,62	9,98	6,19	92,08%	93,06	99,2	0,28
4a - SHPS Aquecedor	0,62	44,10	27,34	65,00%	80,70	108,0	0,30
4b - SHPS Flex	0,62	69,30	42,97	44,99%	80,70	123,7	0,34

Fonte: Elaboração do autor com níveis de preços de água e energia dados por Bahia (2017a, 2017b).

Nesta primeira aproximação de economicidade, sem considerar os investimentos no curto prazo e o reinvestimento após os ciclos de vida, os custos de oportunidade e os custos ou impactos ambientais, ficam empatadas, em primeiro lugar, as Opções 2 – SAS Convencional e 3a - ASBC-PVC, seguidas pelas 3b - ASBC-PP, 4a – SHPS Aquecedor e 4b – SHPS Flex em segundo, terceiro e quarto lugares, respectivamente. A Opção 1 – ChE figura em última colocação.

Em uma segunda aproximação será necessário considerar, ainda, que existem medidas capazes de eliminar em grande parte, e até na totalidade, o desperdício hídrico dos SAS, através de soluções comportamentais e/ou de novos acessórios simples, inclusive com materiais reciclados, como a dada pelo Cietec (2009) de que tubulações com mais de 3 m devem ser termicamente isoladas para minimizar prejuízos, combinando uma camada de material isolante (escolhido pelo usuário) com uma chapa fina de alumínio ou de latas de 18 litros (há no Brasil,

alternativamente, tubulações comerciais de cobre, em conformidade com a NBR 15345, com isolamento de polietileno expandido), ou ainda com uso de um dispositivo simples e barato de bombeamento capaz de fazer a água da tubulação circular continuamente, reaquecendo-se.

1.6 HIERARQUIZAÇÃO: SEGUNDO AJUSTE

Diferentemente da análise precedente, nos dados a seguir discutidos estão sendo previstos dois cenários: Cenário 1 (C_1), com a hipótese de que nenhuma medida seja adotada contra os desperdícios de água dos SAS e Cenário 2 (C_2), com a hipóteses de desperdício zero, cabendo, entre os dois cenários, questões sérias sobre os links entre as mudanças cultural, estrutural e tecnológica, que não caberia aqui tentar abordar, por maior que seja a sua relevância (WEAVER, 2017; KIPERSTOK; MARINHO, 2001). Como medida da disparidade entre as opções, será determinado, na análise a seguir, o limite de banhos extras que as opções mais eficientes propiciam, até terem o custo final do banho equiparado ao da Opção 1 – *ChE*.

Esta segunda aproximação difere da anterior também por considerar os danos ambientais em termos dos custos de emissões de carbono, nivelados a patamares regionais compatíveis com a consecução das metas do acordo de Paris (US \$ 50 = R\$ 159,00 no câmbio de US \$ / R \$ = 3,18 de outubro de 2017) (CHIARETTI, 2017; SEQUESTRAR CARBONO, 2017). A estimativa de impactos de CO₂ equivalente em g/(kW·h) da Tab. 1.2 considera as proporções da matriz elétrica do NE, com geração hídrica de 25%, termelétrica 25%, eólica 30% e 20% importada (sobretudo hídrica) (ONS, 2017), com os fatores $86,21 \times 10^{-3}$ para geração hídrica, $752,77 \times 10^{-3}$ para termoeletrica e $19,66 \times 10^{-3}$ para eólica, cabendo frisar que tais emissões de Gás de Efeito Estufa (GEE) das gerações hídricas local e importada são medidos em regime de acumulação (barragem), os da termelétrica por queima de óleo e todos por suas médias harmonizadas multifatoriais, conforme apontado na revisão de literatura (MIRANDA, 2012).

Outra distinção desta abordagem é a consideração dos custos de oportunidade (CO) dos investimentos nas diferentes opções. Eles poderiam ser concebidos como as perdas em relação a outras possíveis aplicações do recurso em contextos alheios à presente discussão, como no mercado de capitais à taxa de juros vigente, ou em projetos mais rentáveis na área de geração de energia, mas eles serão aqui tratados como deseconomias diretas de uma opção em relação

à mais barata. Ilustrando-os, se uma opção implica no consumo/mês de R\$ 120,00 em energia e a mais econômica implica em apenas R\$ 20,00, incorre-se em um CO mensal de R\$ 100,00.

Uma observação financeira cabível diz respeito aos custos anuais de manutenção dos SAS não convencionais e bombas de calor, respectivamente, relacionados às limpezas do reservatório e repinturas anuais dos coletores, e às visitas de manutenção preventivas (uma ou duas por ano) ou para eventuais consertos e troca de peças. Em geral, o custo da manutenção anual do SAS de PVC ou PP é essencialmente o da tinta esmalte para PVC, cujo galão de 3,6 L é capaz de pintar até 75m² de superfície a um custo em torno de R\$ 75,00, e resulta 1 R\$/m². Considerando 4 m² de área dos coletores e duas pinturas anuais⁸, serão R\$ 8,00 por ano, aproximados para R\$ 10,00 com os custos implícitos com material de limpeza e pinceis. Os SHPS são industrializados e gozam de garantias nos primeiros anos, dispensam limpezas e pinturas, mas uma visita técnica preventiva está aqui prevista a um custo de R\$ 60,00, a partir do segundo ano do ciclo de vida. A manutenção do ChE está estimada em 01 resistência (R\$10,00) e instalação (R\$30,00) anuais.

A última consideração é relativa à irradiação no Nordeste (e Bahia), que difere da de Campinas, alterando proporcionalmente a necessidade de recurso à resistência auxiliar, modificando os custos operacionais e de oportunidade dos SAS e os impactos de emissões de CO₂ a montante. Conforme a segunda e mais recente edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar (agosto de 2017), com aferições feitas pelo LABREN (Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia) / CCST (Centro de Ciência do Sistema Terrestre) / INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) – Brasil (PEREIRA et al., 2017), a média interanual de irradiação nordestina é a mais estável do país e oscila entre 5,39 a 5,59 kWh/m², ultrapassando 6,0 kWh/m² em muitos pontos, conforme cartografia apensa no Anexo C. Adote-se aqui 5,49 kWh/m² por ser a média dos extremos médios interanuais, contra os 4,9 kWh/m² de Campinas.

A relação de eficiência (η) dos SAS com a irradiação solar (I) já estava definida pela Eq. 7. Como as opções 2 – SAS-C, 3a – ASBC-PVC e 3b – ASBC-PP precisaram, respectivamente, de 8,73, 9,43 e 9,98 kWh/m² com a irradiação de Campinas, com a do Nordeste precisarão das quantidades inversamente proporcionais de 7,79, 8,42 e 8,91 kWh/m², ajustando a Tab. 1.11 à 1.14. A seguir as Tab. 1.12 e 1.13 lançam custos de oportunidade das opções computando os ajustes.

⁸ Prima-se aqui pela eficiência térmica do ASBC, mas há orientações menos zelosas onde a pintura é quadrienal.

Tabela 1.12 - Análise de economicidade de energia (irradiação nordestina)

OPÇÃO (n)	ANO 0			20 ANOS			Custo de Oportunidade Operacional Acumulado $\sum (Fn - Fn_{min}), n_{min} = 2. / (R\$)$
	A	B	C	D	E	F	
	Vida Útil (CV) / anos	Custo de Aquisição /(R\$)	Instalação / (R\$)	Manutenção / (R\$)	Reinvestimento (20/A)*(B+C) / (R\$)	Custos Mensais Acumulados / (R\$)	
1 - ChE	5	70	30	800	400	1 300	18 749
2 - SAS Convencional	20	5 139	400	102	5 539	11 180	1 159
3a - ASBC-PVC	10	450	350	200	1 600	2 600	1 252
3b - ASBC-PP	10	450	350	200	1 600	2 600	1 326
4a - SHPS Aquecedor	10	3 649	359	1 080	8 016	13 103	6 562
4b - SHPS Flex	10	2 878	288	1 080	6 331	10 577	10 312

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 1.13 - Análise de economicidade de água em 20 anos (dois cenários)

OPÇÃO (n)	Custos Mensais Acumulados / (R\$)		Custo de Oportunidade Operacional Acumulado $\sum (In - In_{min}), n_{min} = 1, 4a e 4b / R\$$	
	H	I	J	K
	C1	C2	C1	C2
1 - ChE	19 368,96	19 368,96	-	-
2 - SAS Convencional	22 334,47	22 775,11	2 965,51	3 406,15
3a - ASBC-PVC	22 334,47	22 775,11	2 965,51	3 406,15
3b - ASBC-PP	22 334,47	22 775,11	2 965,51	3 406,15
4a - SHPS Aquecedor	19 368,96	19 368,96	-	-
4b - SHPS Flex	19 368,96	19 368,96	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 1.14 - Despesas mensais brutas com água e energia na Bahia e de custo do banho - Segunda Aproximação (cenário 2 e irradiação nordestina)

OPÇÃO (n)	ENERGIA			ÁGUA	Custo TOTAL / R\$	Custo do Banho / R\$
	ϕ_n Preço / R\$ / (kW·h)	ψ_n Consumo / (kW·h)	τ_n Custo / R\$	σ_n Custo / R\$		
1 - ChE	0,62	126,00	78,12	80,70	158,82	0,44
2 - SAS Convencional	0,62	7,79	4,83	80,70	85,53	0,27
3a - ASBC-PVC	0,62	8,42	5,22	80,70	85,92	0,27
3b - ASBC-PP	0,62	8,91	5,52	80,70	86,23	0,27
4a - SHPS Aquecedor	0,62	44,10	27,34	80,70	108,05	0,30
4b - SHPS Flex	0,62	69,30	42,97	80,70	123,67	0,34

Fonte: Elaboração do autor.

1.7 HIERARQUIZAÇÃO: TERCEIRO AJUSTE

À altura da análise da Tab. 1.14 com Cenário 2 e Irradiação Nordeste, subsistiria um empate técnico entre os SAS não convencionais, em primeiro lugar, seguidos pelo SHPS Aquecedor e o SHPS Flex. O *ChE* segue em última colocação. Último empate emerge à Tab. 1.15 que sintetiza a análise.

Tabela 1.15 - Síntese de Economicidade e Ecoeficiência em 20 anos (dois cenários e irradiação nordestina)

OPÇÃO (n)	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	X
	Custo do SISTEMA =Aquisição + Instalação + Manutenção + Reinvestimento /(R\$)	Despesas com ENERGIA / (R\$)			Despesas com ÁGUA / (R\$)			Custo TOTAL /(R\$)		Custo do Banho /(R\$)	
		Brutos	Custo de Oportunidade	Efeito Estufa CO ₂ eq = Σt/(kW·h)*R\$15 9,00	C 1	C 2	Custo de Oportunidade (C1)	C 1	C 2	C 1	C 2
1 - ChE	1 300,00	18 748,80	17 589,94	1 119,75	19 368,96	19 368,96	-	59 247,19	59 247,19	0,69	0,69
2 – SAS Convencional	11 179,88	1 158,86	-	69,24	22 334,47	22 775,11	2 965,51	38 217,85	37 777,21	0,44	0,44
3a - ASBC-PVC	2 600,00	1 252,36	93,50	74,83	22 334,47	22 775,11	2 965,51	29 836,13	29 395,49	0,35	0,34
3b - ASBC-PP	2 600,00	1 325,53	166,67	79,20	22 334,47	22 775,11	2 965,51	29 991,22	29 550,58	0,35	0,34
4a – SHPS Aquecedor	13 103,44	6 562,08	5 403,22	392,10	19 368,96	19 368,96	-	45 221,90	45 221,90	0,52	0,52
4b – AHPS Flex	10 576,87	10 311,84	9 152,98	616,16	19 368,96	19 368,96	-	50 642,96	50 642,96	0,59	0,59

Fonte: Elaboração do autor.

Chegando à etapa final deste estudo, emparelham-se em primeiro lugar os ASBC de PVC e PP. Este último perde para o primeiro com uma diferença nítida quanto às colunas *O* e *P*, que podem ser objeto de escolha. Em seguida está o SAS Convencional que, por sua eficiência maior, emite menos CO₂ que eles, possível segundo critério de escolha.

Em terceiro lugar restou indicado a bomba de calor exclusiva para aquecimento, cujo efeito estufa já é incomparavelmente maior que os produzidos pelos SAS, bem como os produzidos pelo SHPS Flex, quarto colocado, ainda mais expressivos, embora a diferença de custo não seja. Estas relações hierárquicas sustentam-se em ambos os cenários, mas não elidem o empate final.

Caberá ao usuário ou consultor decidir, portanto, por algum critério exterior à eficiência (econômica), que sistema de aquecimento adotará, e.g., face a suas ecoeficiências energética, hídrica e de emissões de CO₂eq, conforme sua escala de prioridades, circunstâncias climáticas locais, tendências dos preços da eletricidade e água tratada, considerando seu efeito cumulativo.

Tabela 1.16 - Vantagens comparativas

OPÇÃO (<i>n</i>)	ECONOMIA TOTAL / (R\$ 1 000,00)		BANHOS EXTRAS / (1000 unidades)	
	C1	C2	C1	C2
1 - ChE	0,00	0,00	0,00	0,00
2 - SAS Convencional	21,03	21,47	47,54	49,10
3a - ASBC-PVC	29,41	29,85	85,17	87,73
3b - ASBC-PP	29,26	29,69	84,28	86,82
4a - SHPS Aquecedor	14,03	14,03	26,80	26,80
4b - SHPS Flex	8,60	8,60	14,68	14,68

Fonte: Elaboração do autor.

A Tab. 1.16 estima, em milhares, o volume acumulado de economias em relação à opção mais dispendiosa (ChE) e o número de banhos extras que esta poupança propiciará aos beneficiários.

Estas potencialidades são expressivas, e podem apoiar a tomada de decisão sobre que sistema escolher, sem subestimar a ecoeficiência imbricada nos números e as complexidades ocultas. Dois exemplos de análise que estão comprometidas com hipóteses que apresentam indícios de afastamento com a realidade complexa são, todavia, análises de ciclo de vida (ACV) dos SAS.

Mesmo este importante arcabouço teórico-metodológico pode oferecer orientações intrigantes. Sabe-se que, além do ASBC de PVC e PP aqui discutidos, existem outros ASBC, embora relativamente improvisados ainda, alguns deles feitos a partir de materiais reciclados, inclusive os com garrafas PET que, não obstante funcione e seja muito barato, não foi aqui discutido, pois não tem características técnicas cientificamente validadas e amplamente difundidas, mas já foram considerados responsáveis por gerar degradação ambiental, devido à destinação final de seus componentes após o CV do sistema, e menos limpos que os SAS industrializados, cuja cadeia logística reversa, ainda em expansão, presumiu-se que seja melhor (ARANTES, 2009). Em primeiro lugar, embora o Inmetro assim o oriente, os SAS ainda não têm uma LR no Brasil; em segundo lugar, os SAS-PET não estão apenas gerando descarte, pois eles recuperam as PET. O balanço de massa, neste caso, no pior cenário, é nulo; mas nele as PET encontraram utilidade.

Tabela 1.17 - Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida (AICV) - São Paulo (SP)

CATEGORIA DE IMPACTO	Opção 1 - ChE	Opção 2 - SAS-C	Híbrido SAS + Gás	Unidade
Mudanças Climáticas (CC)	7,09E-02	9,80E-02	7,83E-01	kg CO ₂ eq
Acidificação Terrestre (AC)	2,69E-04	4,36E-04	3,64E-04	kg SO ₂ eq
Eutrofização Aquática (EUA)	3,14E-05	6,95E-05	6,23E-05	kg P eq
Depleção de Recursos Hídricos (WD)	5,84E-02	1,17E-01	5,78E-02	m ³
Depleção de Metais (MD)	1,62E-02	4,40E-02	4,04E-02	kg Fe eq
Depleção de Recursos Fósseis (FD)	2,25E-02	3,24E-02	2,63E-02	kg óleo eq

Fonte: Kulav, Viñas e Hespagnol (2015).

Um segundo exemplo de ACV que inspira revisões de resultados indicou que o SAS-C híbrido (coletores convencionais assistidos por queimadores de gás) provocaria muito mais mudanças climáticas que a Opção 1- ChE conforme a Tab. 1.17 (KULAY; VIÑAS; HESPANHOL, 2015).

Esta ACV valeu-se do método ReCiPe Midpoint (H) à versão 1.07 e, segundo ela mesma, as opções discutidas não apresentam impactos significativos quanto às categorias Acidificação Terrestre (AC) e Eutrofização Aquática (EUA), mas os SAS supostamente provocariam altas Depleções de Metais (MD) e Recursos Hídricos (WD). No caso da MD, simulações de impacto sugerem que, mesmo com a hipótese heroica de uma taxa de LR igual a zero, em claro desacordo com os fatos, pois os metais nobres do SAS-C como o cobre e o alumínio são altamente recicláveis, inclusive por norma do Inmetro⁹, o percentual do impacto de resíduos

⁹ A LR dos SAS é expressamente recomendada pelo Anexo B da NBR 15747-1, que ainda orienta que na fabricação do SAS não seja usado nenhum material que não possa ser totalmente reciclado.

sólidos face aos demais impactos é relativamente irrelevante (e.g., emissões de CO₂ a montante, em que há indício de o ChE ser mais impactante que o SAS em termos das mudanças climáticas, e não o contrário); e, como se não fosse cientificamente devido, os números foram apresentados sem a avaliação das incertezas associadas aos mesmos (PRIMO; SILVA; KALID, 2018).

Todavia, a hipótese desta ACV sobre a WD supera a anterior em sua capacidade de despertar insegurança, pois parece estar vinculada a bias de pesquisa que devem ser revistas com cautela: experimentos de um membro desta equipe utilizaram duchas com vazões menores para o ChE e maiores para os SAS; este procedimento configurou-se como forte indício de ter implicado em maior consumo de água para estes, resultados contra os quais manifestaram-se, através de nota técnica, peritos do Grupo de Estudo em Energia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (GREEN-PUC-MG), do acordo de cooperação entre a *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit* (Sociedade de Cooperação Técnica Alemã) e a Centrais Elétricas Brasileiras S.A (GTZ-Eletróbrás), da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar-Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA) e do Instituto Ekos Brasil (IEB), além de repelidos por entidades como o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura (IBDA), o Instituto para o Desenvolvimento, Meio Ambiente e Paz (VITAE CIVILIS), a EcoHabitar - Arquitetura e Construção (EH) e a Ecoa - Ecologia e Ação (ECOA) (IBDA, 2017; ECOHABITAR, 2010).

1.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS - DESAFIOS E OPORTUNIDADES DOS SAS

A crise hídrica está cuidando de revisar as opções tecnológicas tradicionais de aquecimento de água para uso domiciliar. A pesquisa e a substituição ou combinação progressivas da Opção 1 - ChE face aos SAS e ASBC, ou ainda os SHPS são uma tendência global, particularmente na zona entre os Trópicos, processo que já está em curso em muitos pontos do Nordeste e da Bahia.

Relativamente menos ecoeficientes em outras regiões com menor irradiação, o SAS Convencional e o ASBC são soluções técnicas testadas, viáveis e com tempo retorno do investimento cada vez mais curto, com o avanço de suas eficiências. Este último supera largamente o primeiro no quesito inserção social, por necessitar de aproximadamente 10% do seu investimento, ou até menos, com rendimento térmico equivalente, embora com ciclo de vida mais curto.

O SAS convencional é energeticamente o mais eficiente dos SAS e por isto o mais ecoeficiente quanto às emissões de CO₂ a montante, podendo ser também o mais ecoeficiente por resíduos se considerado que a logística reversa (LR), após o CV, o retire do meio social para reciclagem, como recomenda expressamente o Inmetro e é do interesse de diferentes atores da cadeia LR. Têm os SAS-C melhor desempenho térmico no Centro-Oeste e Norte da Bahia, mas exigem investimentos iniciais altos face à renda local, pelo que os ASBC nelas são os mais promissores.

Modelagens computacionais estão disponíveis para determinar as dimensões ótimas dos SAS prediais e domiciliares em todas as regiões do país e do mundo, mas o presente estudo ressentese da escassez da literatura de experimentos mais específicos de ecoeficiência e economicidade dos SAS, particularmente para a Bahia, tão irradiada. As referências da literatura sobre os possíveis impactos socioambientais das opções precisam ser revistas à luz empírica das condições climáticas, industriais, de LR e culturais locais.

Os SHPS precisam ser testados em suas funcionalidades reversas de aquecer/resfriar para convalidá-lo no NE e Bahia, sendo mais adequado aos climas temperados encontrados no Recôncavo e Litoral baianos. Mesmo nestas sub-regiões do estado, frise-se que os SAS ainda são mais econômicos por usarem, predominantemente, a irradiação solar, fartamente disponível durante o ano. Esta alta eficiência se atesta na maior parte das regiões ensolaradas intertropicais.

Entre os fatores que cooperam, e.g., no Brasil, NE e Bahia, para difusão dos SAS, estão as altas temperaturas médias diárias e a iluminação solar abundante e bem distribuída ao longo das estações (Anexo C), a presença, na maioria das casas, de uma caixa de água no forro (desejável baixa pressão para o reservatório térmico), bem como do chuveiro elétrico de apoio em dias nublados; o ASBC apresenta ainda a vantagem da simplicidade construtiva, baixo preço e uso do PVC, material fácil de ser encontrado. As opções de SAS-C individuais prediais seguirão sendo as mais dinâmicas, enquanto uma política de fomento às opções coletivas não ousar romper as barreiras econômicas à entrada da tecnologia nas zonas metropolitanas e nas centrais.

Os maiores entraves ao amplo uso dos SAS convencional e ASBC são o custo inicial do primeiro e, para ambos, o desperdício de água nos instantes iniciais do banho, o que requer maiores pesquisas para superá-lo. Note-se, todavia, que medidas de baixo-custo podem reservar a água fria e, se os banhos são sucessivos, isto é desnecessário. Independente delas, as tubulações podem ser termicamente isoladas, alongando o tempo de preservação do

aquecimento, evitando perdas; como visto acima, o Cietec (2009) oferece soluções simples. Por fim, a instalação um sistema de bombeamento similar ao usado nos aquários é capaz de fazer a água quente e fria circular pela tubulação, eliminando a questão; bomba de baixo custo, alimentada por energia fotovoltaica.

Frisando alguns resultados genéricos, inferiu-se que o termossifão passivo é mais ecoeficiente em regiões tropicais com climas e incidência solar análogos ao do NE ou Bahia, Brasil, pois seus impactos associados aos sistemas auxiliares de resistência elétrica ou gás serão mínimos. Quanto aos impactos pós-CV, o SAS têm potencial de reciclagem de materiais via logística reversa industrial. Esta é uma linha de estudo estrategicamente consequente, bem como a que visa minimizar o desperdício de água nos momentos iniciais dos banhos aquecidos pelos SAS, tais como: uso de bomba movida a energia solar para recirculação da água aquecida, o que eliminaria o desperdício da água fria nos instantes iniciais de sistemas com aquecimento central da água o isolamento da tubulação com água quente e a mudança de hábitos para que as pessoas passem a tomar banhos de forma sucessiva.

A renitência de empates técnicos quanto à eficiência (econômica), em todas as aproximações realizadas, não indica que as opções sejam equivalentes ou indiferentes, mas que é necessária uma deliberação ativa, da parte do *stakeholder*, *policymaker* e/ou consultor, por algum critério externo a esta eficiência, e.g., por suas ecoeficiências energética, hídrica e de emissões de CO₂eq, conforme sua escala de prioridades e circunstâncias climáticas locais, tendências dos preços da eletricidade e da água tratada, decisão de médio e longo prazos dado o CV de 20 anos.

Considerando, por hipótese, que os atuais custos estejam em equilíbrio estável e guardando as especificidades regionais e, em particular, as da Bahia, é possível inferir, contabilizados os custos brutos e de oportunidade de uso da água e energia, do uso de energia auxiliar, dos fluxos de investimento e reinvestimento, ao longo de 20 anos, nos dois cenários futuros:

1º) a opção 3a – ASBC-PP e 3b – ASBC-PVC foram similarmente promissoras ao NE, particularmente ao Centro-Oeste e Norte do estado da Bahia, ficando em 1º lugar;

2º) as duas SHPS ficam indicadas a sub-regiões de menor irradiação no NE, como, na Bahia, a Centro-Leste e Sul, bem como nas afetadas pelo sombreamento urbano,

porém são opções futuras, pois ainda não são amplamente industrializadas no Brasil, pelo que não contam com economias de escala que as façam mais populares.

3º) O ChE figurou em última posição em todos os processo de aproximação comparativa sucessivos, em que foram considerados paulatinamente os custos brutos de curto e longo prazos, custos de oportunidade, emissões a montante, investimento de aquisição, manutenção, reinvestimento, revelando-se uma tecnologia em substituição ou combinação da qual o Brasil, como um dos poucos países a utilizá-la na maioria dos domicílios, mas também grandes nações intertropicais, têm muito a ganhar em termos financeiros, de engenharia da energia e economia ecológica.

REFERÊNCIAS

ABREU, S. **Desenvolvimento de um sistema de aquecimento solar compacto utilizando termossifões bifásicos**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

ABREU, S.; COLLE, S. An experimental study of two-phase closed thermosyphons for compact solar domestic hot-water systems. **Solar Energy**, v. 76, n. 1-3, p. 141-145, 2004.

ACHÃO, C.; SCHAEFER, R. Energia e classes de renda no Brasil: um retrato do consumo no setor residencial. In: **X Congresso Brasileiro de Energia**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ-SBPE-CE, 2004.

ALMEIDA, C. **Análise comparativa do sistema solar termodinâmico vs. sistema solar térmico**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Aveiro, 2016.

ALTOÉ, L.; FILHO, D.; CARLO, J. Análise energética de sistemas solares térmicos para diferentes demandas de água em uma residência unifamiliar. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 75-87, jul./set. 2012.

ALVES, G. **Estudo Sobre a Utilização de Energia Solar no Brasil para Uso Residencial**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru – SP, 2014.

ARANTES, L. **Avaliação comparativa do ciclo de vida entre sistemas de aquecimento solar de água utilizados em habitações de interesse social**. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Infraestrutura Urbana), Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO - ABRAVA. **Qualisol**. Disponível em: <http://www.qualisol.org.br/> Acesso: 02 fev. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15569 de 02/2008** - Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e instalação. Rio de Janeiro, Brasil, 2008a.

_____. **NBR 15747-1 de 08/2009** - Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, Brasil, 2009a.

_____. **NBR 15747-2 de 08/2009** - Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares - Parte 2: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil, 2009b.

_____. **NBR 11704: 2008** - Sistemas fotovoltaicos — Classificação. Rio de Janeiro, Brasil, 2008b.

ASTEN. **Ventiladores Refrigeração – Linha Eagle**. 2012. Disponível em: <http://www.asten.com.br>. Acesso: 24 out. 2012.

BAHIA. Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. (Embasa). **Tarifas**. Disponível em: <http://www.embasa.ba.gov.br/centralservicos/index.php/tarifas>. Acesso em: 06 jul. 2017a.

_____. Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (Coelba). **Tabela de Tarifa e Preço Final de Energia Elétrica**. Resolução 2.222 de 22 de abril de 2017b.

BAPTISTA, A. **Análise da viabilidade econômica da utilização de aquecedores solares de água em resorts no Nordeste do Brasil**. 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

BASSO, L. et al. Análise de um sistema de aquecimento de água para residências rurais, utilizando energia solar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p. 14-21, jan./fev. 2010.

BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics**. 3.ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2006.

BEZERRA, A. **Energia Solar: Aquecedores de Água**. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 1986.

BLISS, R. The derivations of several plate efficiency factors useful in the design of flat plate solar heat collectors, **Solar Energy**, 3, 55, 1959.

BORGES, T. **Síntese Otimizada de Sistemas de Aquecimento Solar de Água**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

BOSCOLI, M. **Usuários de habitação de interesse social e adoção de sistema de aquecimento solar de água: estudo de caso em Londrina-PR**. 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

BRASIL. Caixa Econômica Federal. **Aquecimento solar, uma economia de até 30% na conta de luz**. Postado em agosto de 2015. Disponível em: <http://www20.caixa.gov.br/Paginas/Noticias/Noticia/Default.aspx?newsID=2642>. Acesso em: 05 ago. 2017a.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio 1981/2009**. Disponível em: <https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=PD206>. Acesso: 18 out. 2017.

_____. Portal Brasil. **Mais de 183 mil casas têm aquecimento solar no Brasil**. Postado em setembro 2013. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2013/09/mais-de-183-mil-casas-tem-aquecimento-solar-no-Brasil>. Acesso em: 05 ago. 2017.

_____. Presidência da República. **Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001.** Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Brasília: Casa Civil, 2001. D.O.U. de 18.10.2001.

_____. Presidência da República. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília: Casa Civil, 1997. DOU de 9.1.1997.

_____. Presidência da República. **Programa Luz para Todos é prorrogado até 2018.** Postado em janeiro de 2015. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2015/01/programa-luz-para-todos-e-prorrogado-ate-2018>. Acesso: 18 out. 2017.

CARDOSO, A. **Análise da viabilidade econômica da utilização de aquecedores solares de água em resorts no nordeste do Brasil.** 2006. xiii, 141 f., 17 f. de anexo. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

CARMINATTI, H. **Análise experimental de um sistema inteligente de aquecimento solar de água doméstico.** Qualificação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

CARVALHO, A. **Análise de coletor-reservatório solar direcionado a aquecimento doméstico de água.** Qualificação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CASSARD, H.; DENHOLM, P.; ONG, S. Technical and economic performance of residential solar water heating in the United States, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, issue 8, October 2011, pp. 3789-3800.

CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS – CBEM. **Estudo mostra o grande potencial do recurso solar na Bahia frente ao cenário nacional.** Postado em: 20 out. 2014. Disponível em: <http://cbem.com.br/institucional/>. Acesso: 03 out. 2017.

CENTRO INCUBADOR DE EMPRESAS TECNOLÓGICAS - CIETEC. **Manual de Instrução de Manufatura e Instalação Experimental do Aquecedor Solar de Baixo Custo.** São Paulo: CIETEC, 2009.

CHIARETTI, D. Preço do carbono tem de saltar para cumprir acordo do clima, diz estudo. **Valor Econômico**, edição 29, mayo 2017. Disponível em <http://www.valor.com.br/internacional/4984338/preco-do-carbono-tem-de-saltar-para-cumprir-acordo-do-climadiz-estudo> Consulted 21-9,. 2017.

CHOW, T.T. ; FONG, K.F. ; PEI, G. ; JI, J. ; HE, M. Potential use of photovoltaic-integrated solar heat pump system in Hong Kong. **Applied Thermal Engineering**, 2010, Vol. 30(8), pp. 1066-1072.

COELHO, D. **Identificação de variáveis críticas e simulação do uso de coletores solares em prédios residenciais**. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

COLLE, S.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. Economic evaluation and optimization of hybrid diesel/photovoltaic systems integrated to utility grids. **Solar Energy**, v. 76, pp. 295-299, 2004.

_____. Uncertainty in Economic Analysis of Solar Water Heating and Photovoltaic Systems. **Solar Energy**, v.70, pp. 131 - 142, 2001.

COLLE, S.; KOLLER, T. Simulation and performance analysis of a solar domestic hot water system controlled by weather forecast information. **Energy Procedia**, v. 57, pp. 2496-2505, 2014.

COLLE, S.; PEREIRA, E. B. Atlas de Irradiação Solar do Brasil - Primeira versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície. In: **Fontes Não-Convencionais de Energia - As Tecnologias Solar, Eólica e de Biomassa**. 3ª Edição. Florianópolis: LABSOLAR / NCTS, 2000, pp. 75-100.

_____. Atlas de Irradiação Solar do Brasil - Primeira versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície. In: **Fontes Não-Convencionais de Energia - As Tecnologias Solar, Eólica e de Biomassa**. 2ª Edição. Florianópolis: LABSOLAR / NCTS, 1999, pp. 79-104.

_____. Atlas de Irradiação Solar do Brasil - Primeira versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície. In: **Fontes Não-Convencionais de Energia - As Tecnologias Solar, Eólica e de Biomassa**. 1ª Edição. Florianópolis: LABSOLAR / NCTS, 1998, pp. 79-104.

COSTA, R. **Viabilidades térmica, econômica e de materiais de um sistema solar de aquecimento de água a baixo custo para fins residenciais**. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

DA ROSA, F.; MANEA, T.; KRENZINGER, A. Estudo comparativo da utilização de coletores solares planos e tubulares para aquecimento de água. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 4, n. 2, 2013.

DE JONG, P. **Economic, technical and environmental analysis of renewable and non-renewable electricity generation technologies in Brazil**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PEI), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

_____. **Forecasting, integration, and storage of renewable energy generation in the Northeast of Brazil.** Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PEI), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

_____.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. Economic and environmental analysis of electricity generation technologies in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, pp. 725-739, 2015.

DE OLIVEIRA, R. Sistemas de aquecimento de água residencial e o ASBC (aquecedor solar de baixo custo). **Revista Técnico Científica do IFSC**, p. 21, 2011.

DE SOUZA, L.; BEZERRA, J. Sistema Alternativo de Aquecimento Solar. **Anais**, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Brasil, Natal, RN, 2000.

DUFFIE, J.; BECKMAN, W. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.

ECOHABITAR. **Um ogro é um ogro: de novo os chuveiros elétricos.** Disponível em: <http://ecohabitar.com.br/site/2010/05/26/greenwash-de-novo-os-chuveiros-eletricos/> Acesso: 17 out. 2017.

FANTINELLI, J. **Análise da evolução de ações na difusão do aquecimento solar de água para habitações populares:** Estudo de caso em Contagem – MG. 2006. 294 p. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

FARIAS, A.; MEDEIROS, H.; CÂNDIDO, G. Contribuições de eco-inovações para a gestão ambiental de atividades produtivas em um empreendimento da construção civil. **Revista de Administração da UFSM**, 2016, v.9, n.1, pp. 102 -121.

FIGUEREDO, J.C.A. Performance de sistemas de aquecimento solar de água em condomínios. V Congresso Brasileiro de Energia. **Anais**, Vol. 1/3. Rio de Janeiro, 1990.

GARCIA, A. **Fatores associados ao consumo de água em residências de baixa renda.** Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia (PEI-UFBA), Salvador, 2011.

GLEICK, P. Basic water requirements for human activities: meeting basic needs. **Water International**, n. 21, pp. 83-92, 1996.

GOMES, M. **Projeto, construção e análise de eficiência térmica de dois sistemas de aquecimento solar de água de baixo custo.** 2010. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2010.

GONÇALVES, J. **Análise de viabilidade técnico-econômica de sistemas solares combinados a bombas de calor para aquecimento de água**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

GUERRA, M.; VARELLA, F. Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo na cidade de Mossoró (RN). **Holos**, Ano 30, v. 4, 2014, pp. 241-268.

HALAWA, E.; CHANG K.; YOSHINAGA, M. Thermal performance evaluation of solar water heating systems in Australia, Taiwan and Japan – A comparative review. **Renewable Energy**, v. 83, nov., 2015, pp. 1279-1286.

HEPBASLI, A.; ERBAY, Z.; ICIER, F.; COLAK, N.; HANCIOGLU, E. A review of gas engine driven heat pumps (GEHPs) for residential and industrial applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2007; in press.

HEPBASLI, A.; KALINCI, Y. A review of heat pump water heating systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 13 (2009), pp. 1211–1229.

HOTTEL, H.; WILLIER, A. Evaluation of flat plate collector performance. In: **Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy**, 2, University of Arizona Press, 174, 1958.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO DA ARQUITETURA - IBDA. **Um ogro é um ogro: de novo os chuveiros elétricos**. Disponível em: <http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=18&Cod=733> Acesso: 17 out. 2017.

IMPERIAL, L.; PEREIRA, O. Análise do potencial do recurso solar na Bahia a partir de software de informação geográfica baseado na web. V Congresso Brasileiro de Energia Solar (V CBENS), **Anais**, Recife/PE, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Selos de Eficiência Energética**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbeselo.asp>. Acesso em: 09 jul. 2017.

_____.; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Avaliação de dados de medição: Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. Rio de Janeiro: INMETRO, ABNT, 2008.

JURADO, D. **Modelagem dinâmica de um sistema solar termo-sifão usando coletores atmosféricos de plástico**. Dissertação (Mestrado) - FEMEC-UFU, Uberlândia, 2004.

KALOGIROU, S. Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. **Solar Energy**, v. 83, n. 1, pp. 39-48, 2009.

KARA, O.; ULGEN, K.; HEPBASLI, A. Exergetic assessment of direct-expansion solar-assisted heat pump systems: review and modeling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2008; 12(5): 383–401.

KIM, M.; KIM, MS.; CHUNG, JD. Transient thermal behavior of a water heater system driven by a heat pump. **International Journal of Refrigeration**, 2004; 27: pp. 415–21.

KIPERSTOK, A.; MARINHO, M. O desafio desse tal desenvolvimento sustentável: o programa de desenvolvimento de tecnologias sustentáveis da Holanda. **Revista Bahia Análise e Dados**, v.10, n.4, pp. 221-233, 2001.

KRATZENBERG, M.; BEYER, H.; COLLE, S. Uncertainty calculation applied to different regression methods in the quasi-dynamic collector test. **Solar Energy**, v. 80, n. 11, p. 1453-1462, 2006.

KULAY, L.; VIÑAS, R.; HESPANHOL, I. Avaliação de desempenho ambiental de sistemas para fornecimento de água quente para uso doméstico. **Ambiente & Água**, vol. 10 n. 2 Taubaté – Apr. / Jun. 2015.

LAIPRADIT, P.; TAINSUWAN, J.; KIATSIRIROAT, T.; AYE, L. Theoretical performance analysis of heat pump water heaters using carbon dioxide as refrigerant. **International Journal of Energy Research**, 2008; 32: 356–66.

LARA, A.; FACHIN, C. **Sistema de aquecimento e posicionamento de painel solar**. 2013. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

LIMA, Juliana Benoni Arruda. **Otimização de sistema de aquecimento solar de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa TRNSYS**. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

LOPO, A. B. **Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo**. 2010. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2010.

LU AYE, W.; CHARTERS, S.; CHAICHANA, C. Solar Heat Pump Systems for Domestic Hot Water. **Solar Energy** Vol. 73, No. 3, pp. 169–175, 2002.

LUO, Q.; TANG, G.; LIU, Z.; WANG J. A novel water heater integrating thermoelectric heat pump with separating thermosiphon. **Applied Thermal Engineering**, 2005; 25: 2193–203.

MAGAGNIN, A. L. **Impactos econômicos do uso de energia solar para aquecimento de água em residências unifamiliares**. 2010. 77f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2010.

MANEA, T. F. et al. Dispositivo para Medir o Diferencial de Temperatura em Coletores Solares para Aquecimento de Água. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 15, p. 08.61-08.66, 2011.

MANEA, T.; DA ROSA, F.; KRENZINGER, A. Determinação dos parâmetros de desempenho de um coletor solar de tubos de vidro a vácuo. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 3, n. 1, 2017.

MARTINS, F.; PEREIRA, E.; SILVA, S.; ABREU, S.; COLLE, S. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment. **Energy Policy**, v. 36, p. 2843-2854, 2008.

MEDEIROS, J. et al. Avaliação técnica e viabilidade econômica de um sistema de aquecimento solar em um edifício residência. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, [S.l.], n. 24, p. 57-71, Ago. 2015.

MIRANDA, M. **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

OLIVEIRA, A. **Fabricação e estudo de um reservatório térmico e de um coletor de grade absorvedora com tubos PVC na configuração em paralelo**. 2016. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

OLIVEIRA, T. **Análise da viabilidade econômica de um sistema de aquecimento solar de água para uma empresa do setor hoteleiro**. 2011. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. Históricas da Operação - Geração de Energia; 2017. Disponível em: http://www.ons.org.br/historico/geracao_energia.aspx. Acesso em: 14/04/2017.

ORTEB. **Aquecimento Solar**. Disponível em: <http://www.orteb.com.br/aquecimento-solar-industrial.php>. Acesso: 18 out. 2017.

PASSOS, L. **Cenários de impactos da energia solar para aquecimento de água doméstico no contexto de usuários de chuveiros elétricos no Brasil**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

PEREIRA, E. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2.ed. São José dos Campos – Brasil: INPE, 2017.

PEREIRA, E.; MARTINS, F.; ABREU, S.; RÜTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

PEREIRA, M.; DOS SANTOS, C. Protótipo de um sistema de aquecimento de água para população de baixa renda usando energia solar e elétrica, com reaproveitamento de calor. **ForScience**, v. 3, n. 2, p. 56-72, 2015.

PETRUCCI, A.; IOSHIMOTO, E. Modelos para previsão do comportamento de aquecedores de acumulação em sistemas prediais de água quente. **Anais**, X Encontro Nacional de Tecnologias do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu, 2002.

PILATTI, Lauro Antônio Drehmer. **Controle da Temperatura e Vazão de um Chuveiro Usando Lógica Fuzzy**. Relatório (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

PIGOZZO FILHO, Victor César. **Análise experimental de um sistema solar com concentrador cilindro parabólico**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

POZZEBON, F. **Aperfeiçoamento de um Programa de Simulação Computacional para Análise de Sistemas Térmicos de Aquecimento de Água por Energia Solar**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PRIMO, R.; RODRÍGUEZ, J.; SILVA, M.; DE JONG, P.; KALID, R. Consumo y generación de energía como macrosistema ecológico: rutas de calentamiento de agua para hogares tropicales. In.: HERRERA, B.; RODRÍGUEZ, J. (Coord.). **Algoritmos, estrategias y modelos en las aplicaciones de métodos cuantitativos**. Tomo 1. Série "Métodos Cuantitativos Aplicados. Red Iberoamericana de Estudios Cuantitativos Aplicados (RIDECA).", 2018.

_____.; SILVA, M.; KALID, R. Uncertainties of the LCA of Two Water Heating Routes. **3th International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management (ICVRAM) and 7th International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis (ISUMA)**. Florianópolis, SC, abril de 2018.

_____.; SILVA, M.; DE JONG, P.; KOULOUKOU, D.; KALID, R. Water heating systems for tropical homes: a index of economicity and eco-efficiency. **The 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2018)**, Guimarães, Portugal, junho de 2018.

REIS, E. **Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar utilizando coletor com superfície absorvedora em chapas de PVC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Salvador, 2009.

RUSSI, M. *et al.* Estratégias construtivas na busca de conforto térmico e eficiência energética em edificações unifamiliares de interesse social nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 brasileiras. **Revista de Arquitetura da IMED**, v. 1, n.2, 2012, pp. 113-121.

SALAZAR, J. **Economia de energia e redução do pico da curva de demanda para consumidores de baixa renda por agregação de energia solar térmica.** Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SANTOS, N. **Projeto, construção e análise de desempenho de coletores solares alternativos utilizando garrafas pet.** 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

SANTOS, W.; CEOLIN, M.; ALBUQUERQUE, Y.; RICHTER, E. Uso da Pressão Gerada por uma Coluna de Água para Controle da Vazão em Sistemas de Análises em Fluxo. **Quim. Nova**, Vol. 30, No. 7, 1754-1758, 2007.

SÃO PAULO. Universidade de São Paulo - USP. **CIETEC Incubadora de Empresas Tecnológicas – São Paulo.** Disponível em: <http://www5.usp.br/servicos/incubadora-de-empresas-tecnologicas-sao-paulo/>. Acesso: 06 ago. 2017.

SÃO PAULO. **Decreto nº 49.148, de 21 de janeiro de 2008.** Disponível em: http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=22012008D%20491480000 Acesso: 02 fev. 2018.

SEQUESTRAR CARBONO. **O Mercado de Carbono no Mundo – Preço do CO2 – Crédito de Carbono.** Postado em 2017. Disponível em: <https://sequestrarcarbono.com/2017/03/22/o-mercado-de-carbono-no-mundo-preco-do-co2/>. Acesso: 30 out. 2017.

SINHA, S.; TIWARI, G. N. Techno-Economic Evaluation of a solar hot water system. **Energy**, v.19, (n.4), 1994, pp. 479-487.

SIQUEIRA, A. **Desenvolvimento de um programa de simulação computacional de sistema de aquecimento solar para água.** 2003. 131 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SIQUEIRA, D. **Estudo de desempenho do Aquecedor Solar de Baixo Custo.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

SOLETROL. **O Aquecedor Solar de Água em Habitações de Interesse Social.** Disponível em: <http://www.soletrol.com.br/produtos/habitacoes-de-interesse-social/> Acesso: 02 fev. 2018.

SOKOLOV, M.; RESHEF, M. Performance simulation of solar collectors made of concrete with embedded conduit lattice. **Solar Energy**, v. 48, (n.6), 1992, pp. 403-411.

SONG, Z.; ZHANG, H. Prediction of system performance of solar water heaters for a specified locality. **Solar Energy**, v. 28, (n.5), 1982, p. 433-441.

SOPIAN, K; SAHARI, J.; OTHMAN, M.; LUBIS, A.; ZULKIFL, Y. Performance monitoring of a thermosyphon solar hot water heater with a parallel thermoplastic natural rubber tube absorber. **Renewable Energy**, v.4, (n.5), 1998, pp. 561-577.

SOUZA, A. **Desenvolvimento de software para projeto de sistemas centralizados de aquecimento solar de água**. 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SOUZA, G.; SANTOS, N.; FÉLIX, L. Sistema de aquecimento solar utilizando elementos recicláveis. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2, Conferência Latino-americana de la ISES, 3, 2008, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: CBENS ISES-CLA, 2008.

SPRENGER, R. **Aplicação do sistema fechado no aquecedor solar de água de baixo custo para reservatórios residenciais isolados termicamente**: concepção e comissionamento de um sistema-piloto de testes. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

STARKE, A. **Uma análise de sistemas de aquecimento de piscinas domésticas através de bombas de calor assistidas por energia solar**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

STERLING, S. J. **Feasibility analysis of two indirect heat pump assisted solar domestic hot water systems**. Thesis (Master of Applied Science) - University of Waterloo, Canadá, 2011.

STERLING, S. J.; COLLINS, M. R. Feasibility analysis of an indirect heat pump assisted domestic hot water system. **Applied Energy**, v. 93, p. 11-17, 2012.

SUSTAINABLE ENERGY AUTHORITY – SEA. (2000). **Solar Water Heater Rebate Program**, <http://www.sea.vic.gov.au/renewable/SHW/rebate/list.html> (11 August 2000).

TARNIZHEVSKII, B. V. et al. Systems analysis of solar collectors on the basis of a generalized criterion. **Applied solar energy**, v. 28, n. 5, p. 30-34, 1992.

THOMAZ, N. **Sistemas alternativos de aquecimento solar para água do banho no Estado do Rio Grande do Sul**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Eficiência energética aplicada a Processos Produtivos), Universidade Federal de Santa Maria, Quaraí, 2014.

TIAN, Y.; ZHAO, C. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. **Applied energy**, v. 104, p. 538-553, 2013.

TULLY, N. The Influence of Electrical Backup Element Size on the Performance of a Solar Thermosyphon DHW, **System. Energy**, v.20, (n.3), 1995, pp. 209-217.

TUTIA, M. **Utilização de procedimentos multivariados no consumo de água e energia elétrica em habitações sociais com sistema de aquecimento solar**. Tese (Doutorado em Agronomia | Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP Botucatu-SP, 2015.

VANWYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

VIDA SUSTENTÁVEL. **Energia Solar - Pro Sol: Parte 2 de 3** (Qualidade Avi). Postado em 24 de mar de 2015b. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=0dHDZa5D_0I. Acesso em: 05 ago. 2017.

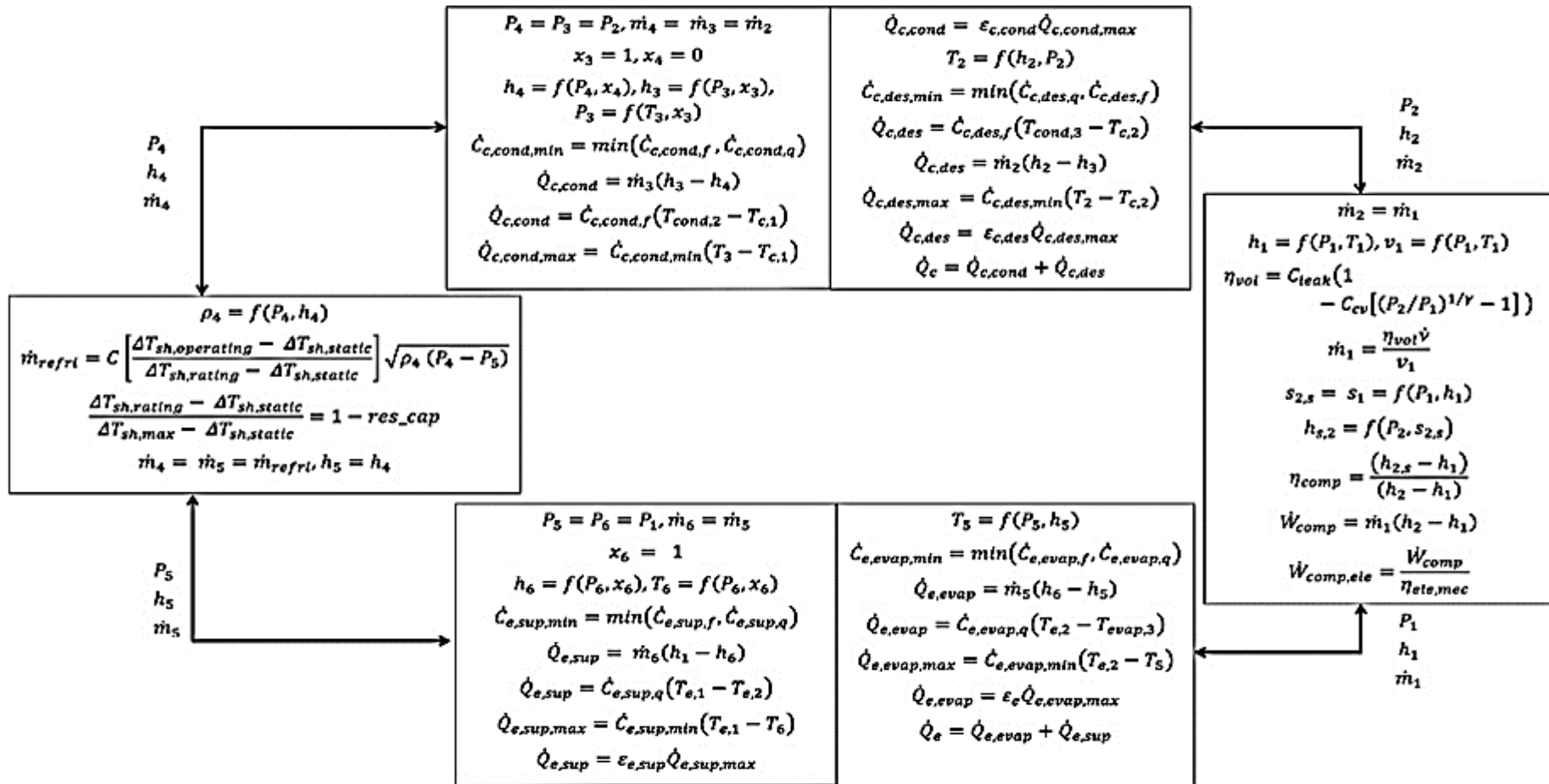
VILLALVA, M. et al. **Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Empregando Inversor com Tecnologia Nacional e Análise Econômica da Energia Produzida**. 8º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural - AGRENER, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/261176361_Sistema_Fotovoltaico_Conectado_a_Re_de_Empregando_Inversor_com_Tecnologia_Nacional_e_Analise_Economica_da_Energia_Produzida. Acesso: 04 fev. 2018.

WEAVER, P. et al. **Sustainable technology development**. New York: Routledge, 2017.

WGSOL. **Legislação sobre aquecimento solar para conjuntos habitacionais**. Disponível em: <https://wgsol.com.br/legislacao-sobre-aquecimento-solar-para-conjuntos-habitacionais/> Acesso em: 02 fev. 2018.

ZHANG, J.; WANG, R.; WU, JY. System optimization and experimental research on air source heat pump water heater. **Applied Thermal Engineering**, 2007; 27: pp. 1029–35.

Anexo A - Interação entre as principais equações do modelo do ciclo de uma Bomba de Calor



Fonte: Starke (2013).

ANEXO A - (Continuação) – Notação

AA.1 - Equipamento:

η_{vol}	-	eficiência volumétrica do compressor
η_{ele}	-	eficiência de conversão eletro-mecânica do motor do compressor
η_{comp}	-	eficiência isentrópica do compressor
v_I	-	volume específico no estado de entrada do compressor
\dot{v}	-	taxa de deslocamento volumétrico do compressor
γ	-	coeficiente de expansão adiabático
C_{leak}	-	coeficiente de vazamento do compressor
C_{cv}	-	coeficiente de volume morto ou nocivo do compressor (<i>clearance volume</i>).
$\mathcal{E}_{e,sup}$	-	efetividade do superaquecimento
$\mathcal{E}_{c,des}$	-	efetividade do desaquecimento
$\Delta T_{sh,static}$	-	grau de superaquecimento mínimo da <i>válvula de expansão termostática</i> (TEV)
$\Delta T_{sh,rating}$	-	grau de superaquecimento nominal da TEV
res_cap	-	fator de reserva de capacidade da TEV

AA.2 - Operação:

\dot{m}_e	-	vazão da corrente externa no evaporador
\dot{m}_c	-	vazão da corrente externa no condensador
m_{refri}	-	vazão do fluido refrigerante
$T_{e,i}$	-	Temperatura do fluido externo na entrada do evaporador
$T_{c,i}$	-	Temperatura do fluido externo na entrada do condensador

AA.3 – Variáveis:

Q	-	taxa de calor trocado
P	-	pressão do condensador
C	-	coeficiente da TEV
T	-	temperatura
W	-	potência consumida
m	-	vazão mássica
h	-	entalpia específica do fluido

AA.4 - Subscritos:

q	-	correntes quente
f	-	correntes fria
i	-	extremidade de entrada de cada corrente;
e	-	correntes
c	-	condensador
$comp$	-	compressor
$evap$	-	evaporação
sup	-	superaquecimento
$cond$	-	condensação
des	-	desaquecimento
min	-	taxa mínima
max	-	taxa máxima
sh	-	superaquecimento
$operating$	-	operação do ciclo
$rating$	-	condição nominal
ele	-	elétrica
res_cap	-	reserva de capacidade
$static$	-	pré-operação do ciclo (antes da abertura da válvula)
1, 2, 3, 4 e 5	-	processo correspondente da variável

ANEXO B – Equações de balanço para os componentes do sistema de aquecimento por Bomba de Calor

Component	Mass analysis using Eq. (the conversion of mass principle)	Energy analysis using Eq. (the first law of thermodynamics or the conversion of energy)	Exergy analysis (the second law of thermodynamics)	Exergy efficiency $\varepsilon = \dot{P}/\dot{F}$
			The irreversibility or the exergy destroyed using Eq. (the exergy balance)	
Compressor (I)	$\dot{m}_{comp.in,r} = \dot{m}_{comp.out,r} = \dot{m}_r$	$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_r(h_{comp.out,act} - h_{comp.in})$ $\dot{W}_{comp,elec} = \dot{W}_{comp}/(\eta_{comp,elec}\eta_{comp,mech})$ $\dot{W}_{comp,elec} = \sqrt{3}V_{comp}I_{comp} \cos\varphi$	$\dot{I}_{comp} = \dot{m}_r(\psi_{comp,in} - \psi_{comp,out,act}) + \dot{W}_{comp}$	$\varepsilon_{comp} = \frac{\dot{E}x_{comp,out,act} - \dot{E}x_{comp,in}}{\dot{W}_{comp,elec}}$
Condenser (II)	$\dot{m}_{cond.in,r} = \dot{m}_{cond.out,r} = \dot{m}_r$ $\dot{m}_{cond.in,w} = \dot{m}_{cond.out,w} = \dot{m}_w$	$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_r(h_{cond.in,act} - h_{cond.out})$ $\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{fc} = \dot{m}_w C_{p,w}(T_{fc,in} - T_{fc,out})$ $\dot{Q}_{sh} = \dot{m}_{air} C_{p,air}(T_{out,air} - T_{in,air})$	$\dot{I}_{cond} = \dot{m}_r(\psi_{cond,in,r} - \psi_{cond,out,r}) + \dot{m}_w(\psi_{cond,out,w} - \psi_{cond,in,w})$	$\varepsilon_{cond} = \frac{\dot{E}x_{cond,out,w} - \dot{E}x_{cond,in,w}}{\dot{E}x_{cond,in,act,r} - \dot{E}x_{cond,out,r}}$ $= \frac{\dot{m}_w(\psi_{cond,out,w} - \psi_{cond,in,w})}{\dot{m}_r(\psi_{cond,in,act,r} - \psi_{cond,out,r})}$
Expansion (throttling) valve (III)	$\dot{m}_{exp.in} = \dot{m}_{exp.out} = \dot{m}_r$	$h_{exp,in} = h_{exp,out}$	$\dot{I}_{exp} = \dot{m}_r(\psi_{exp,in} - \psi_{exp,out})$	$\varepsilon_{exp} = \frac{\dot{E}x_{exp,out}}{\dot{E}x_{exp,in}} = \frac{\psi_{exp,out}}{\psi_{exp,in}}$
Evaporator (IV)	$\dot{m}_{evap.in,r} = \dot{m}_{evap.out,r} = \dot{m}_r$ $\dot{m}_{evap.in,w} = \dot{m}_{evap.out,w} = \dot{m}_w$	$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_r(h_{evap,out} - h_{evap,in})$ $\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_w C_{p,w}(T_{evap,in,w} - T_{evap,out,w})$	$\dot{I}_{evap} = \dot{m}_r(\psi_{evap,in,r} - \psi_{evap,out,r}) + \dot{m}_w(\psi_{evap,in,w} - \psi_{evap,out,w})$	$\varepsilon_{evap} = \frac{\dot{E}x_{evap,out,w} - \dot{E}x_{evap,in,w}}{\dot{E}x_{evap,in,r} - \dot{E}x_{evap,out,r}}$ $= \frac{\dot{m}_w(\psi_{evap,out,w} - \psi_{evap,in,w})}{\dot{m}_r(\psi_{evap,in,r} - \psi_{evap,out,r})}$
Fan-coil units (V)	$\dot{m}_{air,in} = \dot{m}_{air,out} = \dot{m}_{air}$ $\dot{m}_{fc,in,w} = \dot{m}_{fc,out,w} = \dot{m}_w$	$\dot{Q}_{fc} = \dot{m}_{air} C_{p,air}(T_{out,air} - T_{in,air})$ $\dot{Q}_{fc} = \dot{Q}_{cond}; \quad \dot{Q}_{sh} = \dot{Q}_{cond}$	$\dot{I}_{fc} = \dot{m}_w(\psi_{fc,in} - \psi_{fc,out}) - \dot{Q}_{fc} \left(1 - \frac{T_0}{T_{in,air}}\right)$	$\varepsilon_{fc} = \frac{\dot{Q}_{fc}(1 - (T_0/T_{in,air}))}{\dot{m}_w(\psi_{fc,in} - \psi_{fc,out})}$
Fan (VI)	$\dot{m}_{fan.in} = \dot{m}_{fan.out} = \dot{m}_{fan,air}$	$\dot{W}_{fan} = \dot{m}_{fan,air}(h_{fan,out} - h_{fan,in})$	$\dot{I}_{fan} = \dot{m}_{fan,air}(\psi_{fan,in} - \psi_{fan,out}) + \dot{W}_{fan}$	$\varepsilon_{fan} = \frac{\dot{E}x_{fan,out} - \dot{E}x_{fan,in}}{\dot{W}_{fan}}$
Ground heat exchanger (VII)	$\dot{m}_{ghe.in} = \dot{m}_{ghe.out} = \dot{m}_{ghe,w}$	$\dot{Q}_{ghe} = \dot{m}_{ghe,w}(h_{ghe,in} - h_{ghe,out})$ $\dot{Q}_{sh} = \dot{Q}_{fc}$	$\dot{I}_{ghe} = \dot{m}_{ghe,w}(\psi_{ghe,out} - \psi_{ghe,in}) + \dot{Q}_{ghe} \left(1 - \frac{T_0}{T_{ghe}}\right)$ $\dot{E}x_{dest,scol} = \dot{E}x_u + \dot{E}x_{scol}$ $\dot{E}x_u = \dot{m}_{scol,w} C_{scol,w} \left[(T_{out,w} - T_{in,w}) - T_0 \left(\ln \frac{T_{out,w}}{T_{in,w}} \right) \right]$ $\dot{E}x_{scol} = A I_T \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sr}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sr}} \right) \right]$	$\varepsilon_{ghe} = \frac{\dot{E}x_{ghe,in}}{\dot{E}x_{ghe,out} + \dot{Q}_{ghe} (1 - (T_0/T_{ghe}))}$ $= \frac{\dot{m}_{ghe,w} \psi_{ghe,in}}{\dot{m}_{ghe,w} \psi_{ghe,out} + \dot{Q}_{ghe} (1 - (T_0/T_{ghe}))}$
Solar collector (VIII)	$\dot{m}_{scol.in} = \dot{m}_{scol,out} = \dot{m}_{scol,r}$ $\dot{m}_{scol.in} = \dot{m}_{scol,out} = \dot{m}_{scol,w}$	$\dot{Q}_w = \dot{m}_{scol,w} C_{p,w} (T_{out,w} - T_{in,w})$ $\dot{Q}_r = \dot{m}_{scol,r} (h_{scol,out} - h_{scol,in})$		$\varepsilon_{scol} = \frac{\dot{E}x_u}{\dot{E}x_{scol}}$
Domestic hot water tank (IX)	$\dot{m}_{dhwt.in} = \dot{m}_{dhwt.out} = \dot{m}_{dhwt,w}$ $\dot{m}_{load.in,w} = \dot{m}_{load.out,w} = \dot{m}_{load,w}$	$\dot{Q}_{dhwt,w} = \dot{Q}_{dhwt,load}$ $\dot{Q}_{dhwt,w} = \dot{m}_{dhwt,w} (h_{dhwt,in,w} - h_{dhwt,out,w})$ $\dot{Q}_{load,w} = \dot{m}_{load,w} C_{p,load,w} (T_{load,in,w} - T_{load,out,w})$	$\dot{E}x_{dest,dhwt} = (\dot{E}x_{dhwt,in} + \dot{E}x_{load,in}) - (\dot{E}x_{dhwt,out} + \dot{E}x_{load,out})$	$\varepsilon_{dhwt} = \frac{\dot{E}x_{load,out} - \dot{E}x_{load,in}}{\dot{E}x_{dhwt,in} - \dot{E}x_{dhwt,out}}$ $= \frac{\dot{m}_{load,w}(\psi_{load,out} - \psi_{load,in})}{\dot{m}_{dhwt,w}(\psi_{dhwt,in} - \psi_{dhwt,out})}$
Floor heating system (X)	$\dot{m}_{fhs.in} = \dot{m}_{fhs.out} = \dot{m}_{fhs,w}$	$\dot{Q}_{fhs} = \dot{m}_{fhs,w}(h_{fhs,in} - h_{fhs,out})$	$\dot{E}x_{dest,fhs} = \dot{m}_{fhs,w}(\psi_{in} - \psi_{out}) - \dot{Q}_{fhs} \left(1 - \frac{T_0}{T_{fhs}}\right)$	$\varepsilon_{fhs} = \frac{\dot{Q}_{fhs} (1 - (T_0/T_{fhs}))}{\dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out}}$ $= \frac{\dot{Q}_{fhs} (1 - (T_0/T_{fhs}))}{\dot{m}_{fhs,w}(\psi_{in} - \psi_{out})}$
Circulating pumps (XI)	$\dot{m}_{pump.in} = \dot{m}_{pump.out} = \dot{m}_{pump,w}$	$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_{pump,w}(h_{out,act} - h_{in})$ $\dot{W}_{pump,elec} = \dot{W}_{pump}/(\eta_{pump,elec}\eta_{pump,mech})$ $\dot{W}_{pump,elec} = V_{pump} I_{pump} \cos\varphi$	$\dot{E}x_{dest,pump} = \dot{m}_{pump,w}(\psi_{in} - \psi_{out}) + \dot{W}_{pump,elec}$	$\varepsilon_{pump} = \frac{\dot{E}x_{out} - \dot{E}x_{in}}{\dot{W}_{pump,elec}}$ $= \frac{\dot{m}_{pump,w}(\psi_{out} - \psi_{in})}{\dot{W}_{pump,elec}}$

Fonte: Hepbasl e Kalinci (2009).

ANEXO B - (Continuação) - Notação

A	surface area (m ²)
C	specific heat (kJ/kg K)
COP	heating coefficient of performance
$\cos \varphi$	power factor
\dot{E}	energy rate (kW)
\dot{E}_x	exergy rate (kW)
f	friction factor or exergetic factor (%)
\dot{F}	exergetic fuel rate (kW)
h	specific enthalpy (kJ/kg)
I	current (A), global irradiance (W/m ²)
$I\dot{P}$	improvement potential rate (kW)
\dot{I}	irreversibility (exergy destruction) rate (kW)
\dot{m}	mass flow rate (kg/s)
P	pressure (kPa)
\dot{P}	exergetic product rate (kW)
s	specific entropy (kJ/kg K)
\dot{S}	entropy rate (kW/K)
\dot{Q}	heat transfer rate (kW)
T	temperature (K or °C)
V	voltage (V)
\dot{W}	rate of work or power (kW)

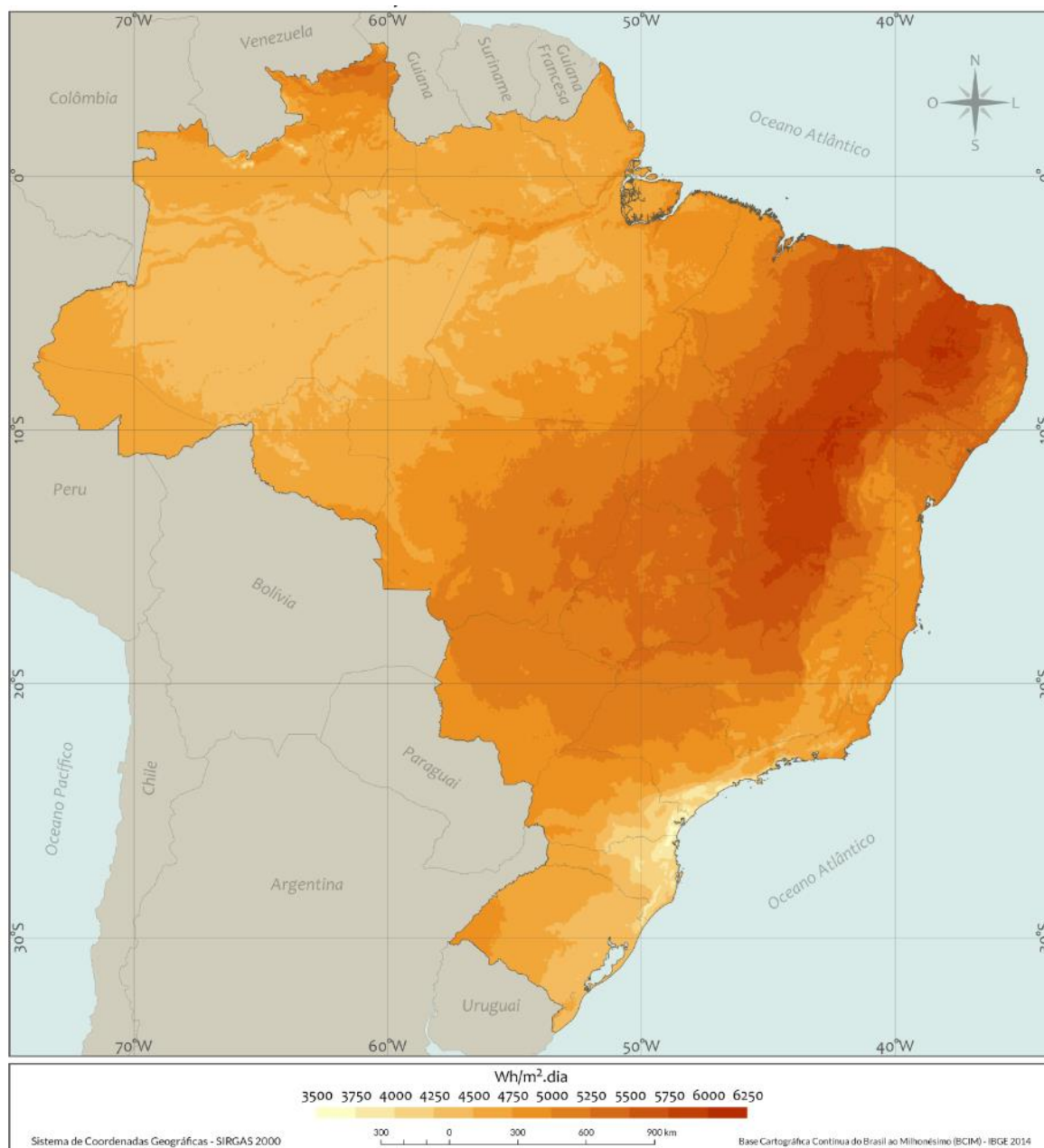
Greek letters

δ	fuel depletion rate (%)
ε	exergy (second law) efficiency
η	energy efficiency
ξ	productivity lack (%)
χ	relative irreversibility (%)
ψ	specific exergy (kJ/kg)

Subscripts

act	actual		
avg	averaged		
c	space cooling		
coll	collector		
comp	compressor		
cond	condenser		
cw	space cooling and water heating		
dest	destroyed (destruction)		
dhwt	domestic hot water tank		
e	evaporation		
elec	electrical	out	outlet, output
evap	evaporator	p	pressure
exp	expansion (throttling) valve	r	refrigerant
fc	fan-coil	scol	solar collector
fh	floor heating	SDHWS	solar domestic hot water system
fhs	floor heating system	sh	space heating
gen	generation	sr	solar radiation
ghe	ground heat exchanger	t	thermal
GSHP	ground-source heat pump	T	total
h	heating	u	useful
HP	heat pump	w	water
i	each unit value	over dot	rate
in	input, inlet	0	reference (dead) state
k	location		
mech	mechanical		

ANEXO C - Total Diário da Irradiação Global Horizontal no Brasil (Média Anual)



Fonte: Pereira et al (2017).

2 CONSUMO Y GENERACIÓN DE ENERGÍA COMO MACROSISTEMA ECOLÓGICO: RUTAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA PARA HOGARES TROPICALES¹⁰

*Rilton Gonçalo B. Primo¹¹; José F. García Rodríguez¹²; Marcelo Silva¹³;
Pieter de Jong¹⁴; Ricardo de Araújo Kalid¹⁵*

RESUMEN

Además de los aspectos que involucran Costes contables y de oportunidad en la adquisición, operación y depreciación de sistemas de calentamiento de agua para hogares, en la toma de decisiones se efectúa también una revisión detallada de sus ecoeficiencias. Las ventajas de los sistemas de bajos impactos ambientales, delante de las capacidades de carga de los ecosistemas locales conexos al macrosistema planetario son crecientes. El objetivo de este ensayo es mostrar que la economicidad de seis rutas tecnológicas de calentamiento no es criterio de decisión suficiente para su adopción, en especial cuando son equivalentes, generando la necesidad de un criterio de desempate, como puede ser la aplicación de un algoritmo del Índice de Economicidad-Ecoeficiencia, a partir de los análisis de las rutas en ambiente económico y clima determinados. Con datos oficiales sobre precios de agua, energía y sobre irradiación solar, el caso estudiado corresponde a Bahía, en el Nordeste de Brasil, y las rutas tecnológicas reñidas con la resistencia eléctrica, dominante en esa región, en su jerarquización decreciente con el algoritmo creado, fueron, en el escenario sin despilfarro de agua y considerados los costes del efecto invernadero: 1º) SCS de bajo costo de Policloreto de Vinilo y de Polipropileno, con IEEr = 50%; pero el SCS de PVC supera al de PP por su eficiencia energética y créditos de carbono; 2º) Sistema de Calentamiento Solar Convencional (SCS-C), con IEEr = 36%; 3º) Solar Heat Pump Systems, con IEEr = 24% y 4º) Air-Source Heat Pump, con IEEr = 15%.

Palabras-clave: Sistemas de Calentamiento Solares. Bombas de Calor. Economicidad. Macrosistema Ecológico.

2.1 INTRODUCCIÓN

La tesis y la práctica del crecimiento económico-industrial ilimitado son ideas superadas hace muchos años ^[1, 2], pero el nuevo paradigma aún no está implantado en la vida práctica de las

¹⁰ Artigo aprovado e publicado, em seleção por pares realizada pela Red Iberoamericana de Estudios Cuantitativos Aplicados (RIDECA), como capítulo do livro *Modelación Matemática a la Toma de Decisiones en la Salud Humana, Medio Ambiente y Desarrollo Humano*. Editado na Espanha (Universidad de Granada) e publicado pela Nova Publishers (New York, EUA), 2018. Foi preservado aqui o sistema de citação do livro, com autores numerados por ordem de aparição, entre colchetes sobrescritos aos locais de referência.

¹¹ Economista. Consultor (Gobierno de Bahía | Banco Mundial). Aceptado en el Doctorado en Economía Política de la Universidad de La Habana (FCE, UH) y la Maestría Académica del Programa en Ingeniería Industrial de la Universidad Federal de Bahía (PEI-UFBA),

¹² Economista. Doctor en Finanzas Públicas y Filosofía. Docente e Investigador de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT, México).

¹³ Economista. Maestro en Regulación de la Industria de Energía (UNIFACS). Doctor en Energía y Ambiente (UFBA). Post-Doctorante (PDJ / CNPq) en Ingeniería Industrial (UFBA). Docente e Investigador de la UFBA e Instituto Federal de Educación de la Bahía (IFBA).

¹⁴ Ingeniero Eléctrico y en Sistemas de Computación (Universidad Monash - Australia). Maestro y Doctor por el PEI-UFBA.

¹⁵ Ingeniero. Maestro (UFBA) y doctor en Ingeniería Química (USP). Docente e Investigador de la Universidad Federal del Sur de Bahía (UFSB) | Centro de Formación en Tecno-Ciencias e Innovación (CFTCI).

industrias y demandantes. La Economía Ecológica nació en esta lucha por la percepción de las insuficiencias de la modelación convencional. Si los recursos no renovables se agotan, la ruptura múltiple de los ciclos de los renovables puede ser crucial. Aunque no es el objetivo de este estudio considerar lo inevitable, se sabe que la exergía o trabajo útil máximo de los sistemas de calentamiento, dado que la eficiencia plena en la conversión es imposible, implica un aumento del grado de entropía, del estado inicial al final de la operación, algo irreversible [3, 4]. En cuanto a lo evitable, son perturbadores los escenarios en que se insertan las rutas reñidas a la ducha eléctrica en ese examen.

Revisando los aspectos teóricos de la economía ambiental y de la economía ecológica, R Souza subraya la emergencia de conceptos valorimétricos no convencionales para los recursos naturales [5], en general y en específico, calcados en el descubrimiento de mercados potenciales para los mismos, como los de Valor de Opción (VO), que considera la disposición del usuario de disponer del recurso en el futuro, dejando de consumirlo excesivamente en el presente, Valor de No-Uso (VNU) o de Existencia (VE), derivado de la satisfacción del usuario con el hecho de un recurso natural aún existente y ser preservado, inspirando cuidados metodológicos de que los datos generados reflejen correctamente la ordenación de preferencias y la disposición real de pagar del individuo cuando se informa adecuadamente sobre las consecuencias más amplias y duraderas de sus actuales elecciones [5, 6], ése es el reto actual de la ciencia.

El objetivo de este artículo es compartir con los *stakeholders* los avances de la literatura sobre el contexto en que operan estos sistemas y sus potenciales impactos, puesto que el agua tratada y la energía disponible para su utilización en hogares tienen, por supuesto, su VO, VNU o VE, además como recursos finitos, producidos con costes e impactos tan importantes que han motivado estudios de ecoeficiencia además de economicidad [7, 8, 9, 10, 11, 12].

Para algunos de los principales centros de investigación en resiliencia planetaria, el Antropoceno¹⁶ está en un dilema profundo, porque el paradigma predominante de desarrollo social y económico permanece ajeno a los riesgos de gran parte de los desastres ambientales inducidos por la capitalización a las escalas continental y planetaria [13, 14, 15]. La expresión quizá más fría y cortante de esta ley es igualar los beneficios de la ecoeficiencia a los ingresos

¹⁶ Era en que la influencia humana sobre los cambios planetarios pasó a ser dominante, a través de procesos circulares acumulativos desestabilizadores de sistemas biofísicos, acciones capaces de generar cambios ambientales abruptos y / o irreversibles y de afectar el bienestar humano de formas deletéreas o aún catastróficas [13, 14].

marginales, y no en cualquier actividad de la industria, sino en el mercado de capitales. Esto no se hace de forma directa y ni siempre es adrede, pero toma lugar cuando en la toma de decisiones de inversión se analizan las rentabilidades financieras y físicas ^[3]. Mientras el algoritmo $(1 + r)^t$ del interés compuesto se retroalimenta sin tregua¹⁷, rivalizando con los retornos no siempre cuantificables o monetizados de las inversiones ecoeficientes de recursos, las especies se extinguen, los ecosistemas se agotan y ocurren, de modo acumulativo, cambios climáticos. Las crisis hídrica, energética y ecológica conducen a la reconsideración de los procedimientos de elección de rutas, conducentes a la valorimetría crítica de los beneficios específicos del no desperdicio de un recurso finito o muchos, como el agua tratada y la energía para fines domésticos, y a estimarlos antes de que alcancen (o tiendan a romper) su umbral de carga sostenible, haciendo disparar Costes marginales y, más que esto, amenazando el sistema entero.

La percepción de esta necesidad de cambiar los modos de evaluar beneficios está día tras día robustecida, verificados los límites críticos del referido Antropoceno. Esas nuevas fronteras de la vida en la modernidad son recalculadas por experimentos del *Stockholm Resilience Centre*, *Stockholm Environment Institute*, *ANU Climate Change Institute*, *Institute of Arctic Biology*, *University of Alaska Fairbanks*, *School of Environmental Sciences*, *Aquatic Ecology and Water Quality Management Group* y otros ^[14, 15, 16] que propusieron un nuevo enfoque para la sostenibilidad global, definiendo las fronteras del planeta dentro de las cuales se espera que la humanidad pueda operar con seguridad, sin cambios no lineales abruptos, ni riesgos de crisis y catástrofes.

Estas contribuciones vienen teniendo repercusiones diversas, pues el interés no es sólo académico¹⁸. Ellos subrayan que tres fronteras planetarias fueron ya violadas, impactando las otras: 1) los cambios climáticos; 2) la pérdida de biodiversidad y 3) los cambios en el ciclo global del nitrógeno. Están cerca de los límites el ciclo del fósforo, la acidificación del océano y la pérdida de la capa de ozono. Ante los riesgos de la interacción simultánea de múltiples

¹⁷ La fórmula compuesta es $M = C(1 + i)^t$ donde M es el importe final, i la tasa de interés; C el capital o el valor inicial y t el tiempo total. Esta exponencial se utiliza en los análisis costo-beneficio de viabilidad de proyectos ecoeficientes hace décadas.

¹⁸ La Nature publicó en su edición de septiembre de 2009 un resumen de su Fronteras Planetarias (originales disponibles en el Stockholm Resilience Center y copia en la dirección <http://www.stockholmresilience.org>) y él, sobre el tema, llegó a grabar una conferencia en el TED titulada *Let the environment guide our development*.

estresores sobre los ecosistemas del planeta, no sólo los agentes locales y los científicos están llamados a intervenir, sino todas las naciones del mundo.

El Stockholm Resilience Centre destacó que las cuestiones biofísicas de estos estudios nos remiten a las cuestiones sociales de la sostenibilidad global ^[17]. Esfuerzos similares ya venían señalando los límites de los ecosistemas en los moldes de una crisis estructural global ^[3]: regulaciones de gases, agua y clima, prevenciones de disturbios, retención solar, ciclos de nutrientes y otros. Hoy se hacen esfuerzos para conectar todo en un macromodelo, y éste a la dinámica social ^[18, 19, 20, 21, 22, 23, 24].

Investigadores remiten a datos estadísticos macroambientales, como el National Energy Modeling System (NEMS), usado más en los EUA, por su Energy Information Administration (EIA), o el Markal-Macro (MM) ^[19, 22], modelo integrado energía-ambiente-economía, usado por los EUA y más de treinta y cinco naciones incluyendo a China, quien generó el escenario de sus emisiones de CO₂ hasta 2050 ^[25, 26], un viraje, sino de la teoría macroeconómico-ambiental, de los instrumentos de planeamiento de *long run* ^[19, 21, 22].

La macroeconomía convencional descuidó el vínculo entre la ecología y el análisis agregado ^[27], porque trataron las restricciones ambientales y la propia economía del medio ambiente como rama de la microeconomía, enfocada en la asignación óptima de recursos, con criterio de maximización de beneficios y minimización de Costes, sin conectar los aspectos micro y macro. En un análisis macroeconómico del ambiente, la "capacidad de carga" del sistema en un momento dado tiene un papel clave. Esta percepción delimita el ámbito del desarrollo sostenible y lleva a que se considere incluso irrealizable el "crecimiento perpetuo", confundido con "crecimiento sostenible" (Id., Ibid), porque, además de caro, es peligroso. Los fundamentos de este enfoque se remontan al análisis que David Ricardo hizo del uso de las tierras menos fértiles ^[27]. La expansión de las fronteras agrícolas a zonas marginales, de menor fertilidad, nivelan por encima el precio de los productos oriundos de las más fértiles. Los desperdicios y el agotamiento de los recursos naturales ya imponen a las sociedades el pago de importes generalmente más elevados de las alternativas, cuando no generan crisis irreversibles ^[28, 29].

A la ubicación de los actores en estudios de ese tipo, con especificidades en términos de los precios ^[30, 31] y climas ^[32, 33], deben adecuarse las variables generales. La revisión de la literatura sobre las tecnologías alternativas lanzará las bases inferenciales de su jerarquización final en

dos escenarios, con y sin despilfarro de agua, durante veinte años. Objetivamente es posible demostrar que las rutas pueden diferir en economicidad, pero que no siempre eso ocurre, exigiendo criterios de desempate relativos a la eficiencia, sobretodo de ecoeficiencia; la ordenación de las rutas, aunque con eficiencias disímiles o indiferentes, deben confirmar la matriz energética local, puesto que los sistemas de consumo/generación de energía son un macrosistema ecológico, saturado y amenazado.

Son desiguales las eficiencias de los sistemas aquí tratados, en cuanto al uso de agua y energía y hay que compararlos simultáneamente. Además, el clima local y coordenadas geográficas influyen en las derivaciones de estas rutas y hay que diferenciar eficiencias equivalentes (o de mismo costo) por criterios externos a la eficiencia, considerando sus impactos durante y después de su ciclo de vida. Finalmente, obsérvese que posibles convergencias de criterios coinciden con restricciones económicas, dinámicas tecnológicas y hábitos culturales; pero, la crisis hídrica las está cambiando.

El alcance preferencial de este estudio es intertropical, en función de la relación entre las irradiaciones solares de esta banda y las tecnologías de la captación térmica y/o híbridas fotovoltaicas. Sin embargo, algunas de estas tecnologías más limpias son eficaces también en las regiones subtropicales. En los casos específicos estudiados, con características de expresiva irradiación solar (llegando a alcanzar $6,5 \text{ kWh} / \text{m}^2$), las regiones tratadas a continuación serán las del Nordeste (NE) brasileño y las del centro-oeste y norte de Bahía, donde las eficiencias de los sistemas operan en los límites nacionales. La franja intertropical está delimitada entre las latitudes $23,27^\circ$ al Norte y al Sur del Ecuador, líneas imaginarias definidoras, respectivamente, de los Trópicos de Cáncer y Capricornio, por ser las regiones en las que el Sol incide perpendicularmente a lo largo de los solsticios, oscilando esta perpendicularidad desde el verano en el Hemisferio Sur (invierno en el Hemisferio Norte) en el umbral de la latitud $23,27^\circ$ N, descendiendo hasta la $23,27^\circ$ S, cuando regresa.

Este estudio se compone, además de esta introducción, de una segunda sección en la que se definen los parámetros de la demanda y precios de agua en la región. Una tercera subraya los rasgos de las rutas. En la cuarta sección se compara y ordenan las rutas por su economía y ecoeficiencia. La conclusión indica oportunidades y retos en Bahía, y sistematiza los resultados.

2.2 RASGOS DE LA DEMANDA

La región Nordeste (NE) es la que más sufre con las sequías y el estrés hídrico en el Brasil. Su potencial de generación hidroeléctrica, en el período de 2012 a 2017, es el peor registrado. En el cuatrienio 2014-2017, la Bahía do São Francisco (BSF), la principal fuente de agua y hidroelectricidad de la región, ha alcanzado el menor flujo de todos los tiempos. Como si no fueran suficientemente malas noticias, los pronósticos son que el cambio climático disminuirá el volumen de precipitación anual en el NE y el flujo de la BSF, respectivamente, en un 47% y 80% hasta 2050, comprometiendo de manera contundente su matriz hidroeléctrica ^[5, 7, 8, 9].

De 2005 a 2007, la generación hídrica doméstica respondía por más del 87% de la electricidad del NE, pero en 2016 cayó a apenas el 25%, quedando otro 25% con la generación termoeléctrica, el 30% con la eólica y el 20% con la energía importada (en gran parte de origen hidroeléctrica) ^[5, 7, 8, 9]. Esos datos proporcionales tienen una conexión directa con el impacto ecológico del consumo de energía, implicando nuevos efectos específicos a cada una de esas modalidades de generación, proporciones que no son fijas, incluso por fuerza de los intentos de sustitución de parte de la generación termoeléctrica por la eólica, con previsión para 2020, de reducción de los Costes nivelados de electricidad en cerca del 46%, con fuerte caída de las emisiones de CO₂, haciéndose promisoras las innovaciones y combinaciones de rutas nuevas para el calentamiento usual del agua ^[6].

Como en otros ambientes tropicales, el más extenso sistema de calentamiento de agua para residencias de Brasil, NE y Bahía es la ducha eléctrica. Aunque esta ruta requiera baja inversión y bajo mantenimiento (cambio de resistencia), y pese que calienta agua con rapidez y no implica un despilfarro de agua, sale muy caro al pueblo y al medio ambiente, ya que no funciona en caso de una caída del suministro de energía, y ha sobrecargado los sistemas de transmisión a las horas pico. En este escenario el Centro Incubador de Empresas Tecnológicas (CIETEC), con sede en el campus de la Universidad de São Paulo (USP/IPEN), introdujo un Sistema de Calentamiento Solar (SCS) con patente libre (para toda la población local y, sobretudo, para trópicos soleados), energéticamente más eficiente y de bajo costo (precio promedio del 10% del convencional), sistema que ha merecido estandarización desde 2001 y convalidaciones de expertos ^[34, 35].

Aquí el SCS aparece en dos modalidades, el sistema con placa recolectora de Policloruro de Vinilo (PVC) y el de Polipropileno (PP) [36, 11]. Hay otro SCS, tipo convencional, ya industrializado en Brasil, el cual será comparado con esas dos opciones de bajo costo. Adicionalmente, aunque sean poco difundidos en los trópicos y en Brasil, serán evaluadas las opciones de bombas de calor, también en dos modalidades, la exclusivamente hecha para calentar (SHPS), y la llamada "aire-agua", con función *flex* de calentar/enfriar, que aprovecha el aire exterior como fuente de energía durante todo el año (ASHP) [37, 38, 39, 40, 41, 42].

En este estudio se toma en cuenta el análisis empírico de Souza y Bezerra [23], considerándose la unidad unifamiliar de consumo de tipo intermedio, en la cual una familia con cuatro personas toman tres baños cada día, de seis minutos cada uno, con ducha estándar y registro medio abierto (5 L/minuto), que representan el consumo diario de 360 L que, considerando, por aproximación, el mes como de 30 días, equivale a unos 11 m³/mes. Además, que su hogar es un apartamento intermedio ubicado cerca de seis pisos debajo de la terraza, en edificios de 10 a 15 pisos. Esa situación, muy frecuente en las ciudades de mayor densidad demográfica constituye un problema, pues genera potenciales despilfarros del agua fría hasta la llegada del agua ya caliente por el sistema térmico cuando se utilizan los SCS convencionales o de bajo costo, cuya agua no fría queda en un reservatorio en la terraza¹⁹. Se puede mitigar esto con el uso de ciertas técnicas, pero hay que estimar el escenario para el cálculo de ese comportamiento imprudente, que puede y debe cambiar [12].

Considerando que en esa situación problema mencionada, la columna media de agua (*c*) tiene 18 m, con tubería estándar de 9,5 mm de radio interno (*r*), el despilfarro (*D*) de agua fría que se vierte antes de la calentada es

$$D = \pi \cdot c \cdot r^2 = 0,005104 \text{ m}^3 \approx 5,1 \text{ L} / \text{baño} = 1,836 \text{ m}^3 / \text{mes} / \text{familia} \quad (1)$$

La Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A – Embasa [11], aplica el siguiente precio a los hogares de ese padrón intermedio (área construida ≤ 60m², como máximo 2 baños y 8 puntos de utilización del agua, sin piscina y energía mono/bifásica):

¹⁹ Esta situación problema fue originalmente propuesta en julio de 2017 por el profesor e investigador Asher Kiperstok como estímulo a la reflexión en los cursos interconexos de Prevención a la Contaminación y Ecología Industrial del PEI-UFBA en la graduación, maestría y doctorado.

$$P = a + 6,23b \mid b = c - 6m^3 \leftrightarrow c = a + b \quad (2)$$

En que P es el pago mensual, a es la demanda mínima ($0 \leq a \leq 6m^3 = \text{precio fijo} = \text{R\$ } 24,2$), b es la demanda variable (sobrepasada de la mínima) y c la demanda total. Eso implica en R\$ 79,55 y R\$ 90,99, respectivamente, sin y con despilfarro (solamente en las rutas SCS). En cuanto a la energía, los precios son aplicados por la Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia - Coelba²⁰ (octubre, 2017), en la tasa de R\$ 0,624/kWh de Consumo Activo. Teniendo como referencia de consumo la ducha eléctrica más encontrada en el mercado brasileño (5 500 W en el máximo y 3 500 W el medio o verano, adoptado aquí) y tiene una demanda de 126 kWh = R\$ 78,62 = 360 baños mensuales de 6 minutos cada.

Tabela 2.1 - Ecoeficiencia energética de las rutas

Ruta (n)	Ecoeficiencia Energética Relativa (η) a la Ducha Eléctrica	Demanda Mensual/ (kW.h)	Coste Mensual Total - ENERGIA / R\$
1 – Ducha Eléctrica	0,00%	126,00	78,12
2 – SCS Convencional	93,07%	7,79	4,83
3a – SCS de Bajo Costo (PVC)	92,51%	8,42	5,22
3b - SCS de Bajo Costo (PP)	92,08%	8,91	5,52
4a - SHPS	65,00%	44,12	27,34
4b - ASHP	44,99%	69,33	42,97

Fuente: Elaboración del autor con datos de la literatura [6, 43, 38].

En la Tab. 2.1 se registran las eficiencias energéticas relativas y correspondientes demandas y costes de las rutas.

2.3 ATRIBUTOS DE LAS RUTAS

El proyecto del SCS convencional de referencia para la presente discusión es el producido a través de un proceso altamente automatizado, que tiene la capacidad de producción en escala con elevada estandarización, involucrando un Colector Solar (dos placas de 2,00 m²), representado por los ítems 1 y 2 de la Fig. 10, cuya descripción es:: 1 y 2 – SCS de máxima eficiencia energética, disponibles en Brasil y certificados por el Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro); 3 – Interior del Air-Source Heat Pump; 4 - SHPSs Reversibles (calentadoras/resfriadoras); 5 - Bombas de Calor para Baño disponible en

²⁰ La firma ofrece a 5,8 millones de clientes en Bahía (88% residenciales) atendiendo a 415 de los 417 municipios del estado.

Brasil; 6 – Bombas de Calor con mínimas emisiones de CO₂ disponibles en los países nórdicos, Polonia y República Checa, eficaces hasta -20°C.

Figura 10 - Rutas tecnológicas ecoeficientes de calentamiento de agua para baño disponibles en Brasil y en el exterior



Fuente: Elaboración de los autores con fotos de oferedores [44, 45, 46, 47, 48, 49]

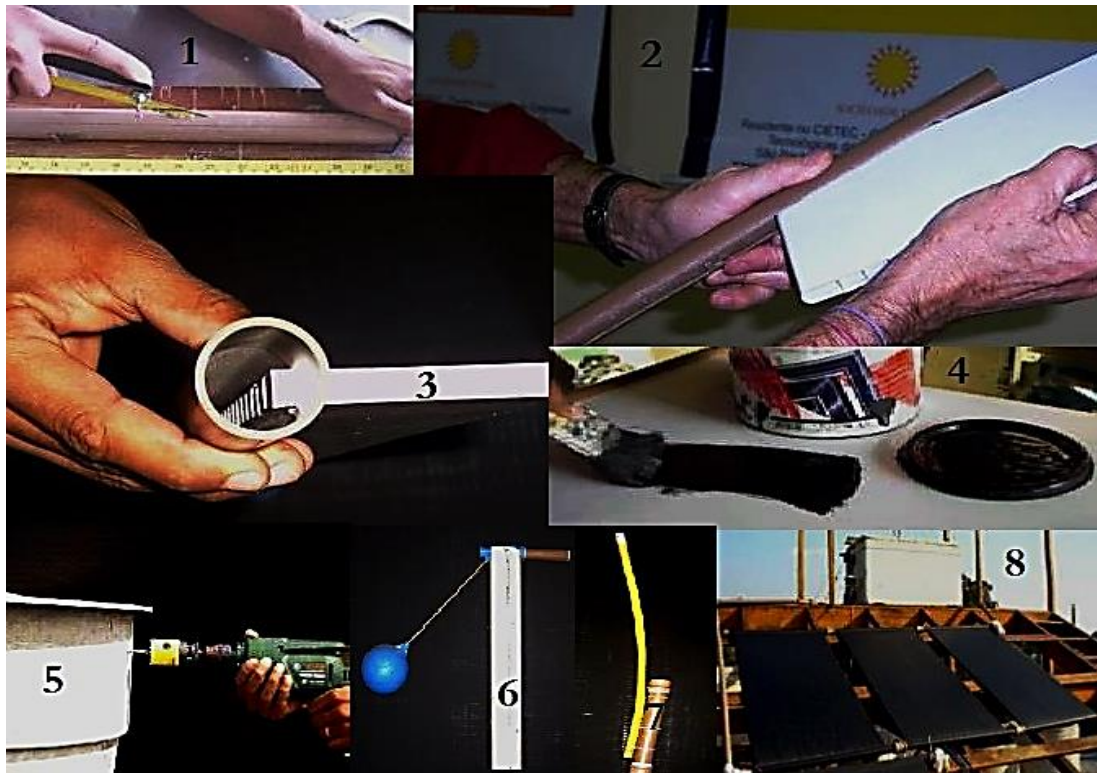
Obs.: Fotografías solamente ilustrativas de las tecnologías disponibles hoy en los mercados brasileños y europeos; ningún de esos productos específicos fue objeto de los experimentos discutidos en la literatura consultada, sino sus similares.

La inversión exigida por un SCS Convencional, con las conexiones terraza-hogar y instalación, es R\$ 5 539,00 en la región estudiada, pero, como esto depende de las dimensiones del sistema, fueron objetos de esfuerzos computacionales [52, 53] capaces de determinar las dimensiones ideales, al mínimo costo, a lo largo de la vida útil del equipo, sin menosprecio de la inversión para la adquisición y mantenimiento del sistema, ni el grado de necesidad de uso de energía auxiliar en cada local de instalación, acoplando, en régimen transitorio, un procedimiento de optimización no lineal a una rutina de simulación numérica de *long run*, con el método de los Gradientes Conjugados, resultando en la mirada del óptimo costo en una superficie tridimensional, que calculó, considerando siete factores decisivos, como los costes totales anuales con la energía eléctrica auxiliar, 5,75 m² para dimensión del colector y 0,26 m³ para el tanque [52], dimensiones indicadas para la región de Campinas (São Paulo), pero demasiado grandes para el NE. Dimensionando los colectores al caso en examen de 4 personas, o sea, para calentar el volumen de 360 L/día, se realizaron algunos experimentos, en el NE [3, 23], con apoyo

de la expresión $Q_u = mc_p \Delta t$, donde Q_u es la cantidad de calor suministrada en kW, m es el caudal másico en kg/s, c_p es el calor específico la presión constante [$4,18 \times 10^3 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$] y ΔT es la variación entre la temperatura final y la inicial del fluido (10°C), quedando indicado que son necesarios $0,7 \text{ m}^2/\text{persona}$ de placa colectora, es decir, $2,8 \text{ m}^2$.

Por su vez, los SCS de bajo costo, tomados aquí como referencia, son hechos por cuatro partes fundamentales: 1- tanque de 200 L de agua destinada a la demanda de una familia de 4 a 6 personas; 2- Colectores de PVC o PP pintados con tintas oscuras para mejor absorción de radiación solar; 3- resistencia eléctrica con mezclador y *dimmer* de apoyo térmico y 4- Sistema general de tubos. Su manufactura está dividida en 8 etapas en la Fig. 11.

Figura 11 - Construcción del SCS da bajo costo



Fuente: Elaboración de los autores con fotos del CIETEC ^[34].

Descripción de la Fig. 11: 1 – Cisura longitudinal de tubería para recepción de la placa de PVC; 2 e 3 – Ajuste de la placa con canales internos de paso de agua; 4 – pintura de la placa con color oscura (preferentemente), para mayor calentamiento; 5 – Orificio superior del tanque para conexión de la tubería que mandará agua calentada en régimen de termosifón; 6 – Flota reguladora del ingreso de agua fría en el tanque; 7 – Sistema de fluctuación de la manguera

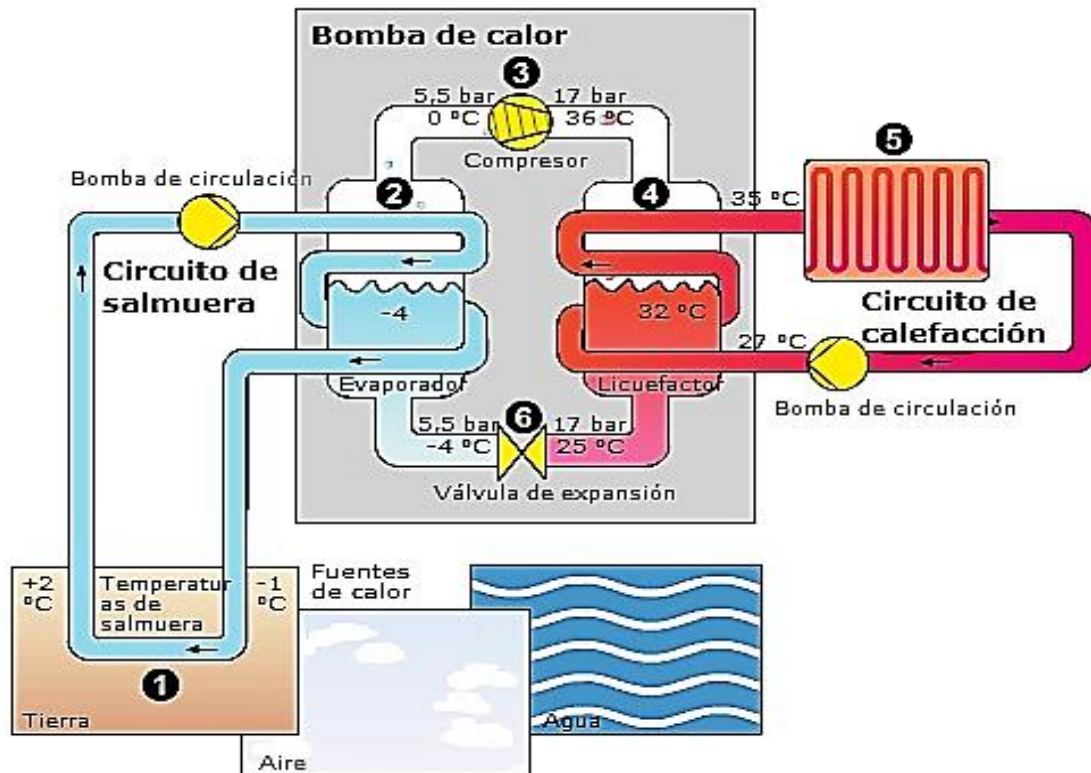
flexible que sacará a agua caliente del tanque por encima, por ser menos densa, y la conducirá al usuario; 8 – SCS con tres placas colectoras instalados en hogar tropical.

Fue padronizado y convalidado experimentalmente por el Centro Incubador de Empresas Tecnológicas (CIETEC) da USP/IPEN y fue certificado por el Banco de Tecnologías Sociales de la Fundación Banco do Brasil y hoy es indicado por el Observatorio por la Tecnología Social en América Latina ^[34, 35].

Como esa ruta debe adaptarse a la demanda y condiciones climáticas locales, cuatro ensayos computacionales fueron hechos en la Universidad Federal de Uberlândia (UFU), con el uso de técnicas de fluidodinámica computacional (Computational Fluid Dynamics) y balances de energía, ayudando en la agudeza de detalles del flujo dentro del sistema y consintiendo predecir su funcionamiento continuo y comparar las dos modalidades de SCS de bajo costo, quedando comprobado que el mejor desempeño es del sistema de PVC, puesto que es más sensible a los cambios de caudal, por su baja inercia térmica, característica ligada a la menor cantidad de ductos y mayor área transversal, respecto al de PP ^[36].

Por fin, trate-se, aunque de modo breve, de dos modelos de SHPS, pero ambos operan de modo termodinámico similar ^[37, 38, 40, 41]: el sistema opera en ciclo de compresión eléctrica de vapor y bombea energía del aire circundante para calentar el agua del tanque reservatorio, valiéndose de los mismos principios mecánicos de las heladeras y aparatos de aire acondicionado, pero en sentido contrario: se expande y condensa un fluido para absorber el calor, y no solamente del aire, sino incluso de la tierra o agua (Fig. 12).

Figura 12 - Modo de funcionamiento de una bomba de calor



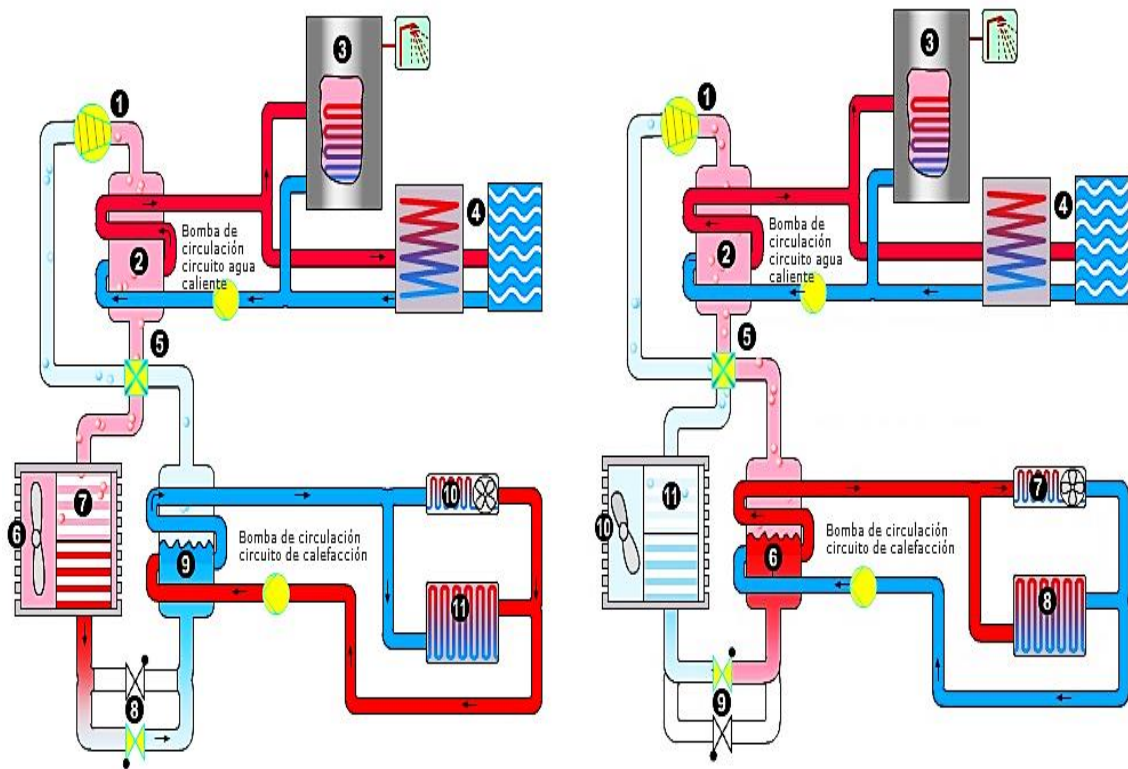
Fuente: Elaboración de los autores con datos de DIMPLEX ^[50].

Descripción de la Fig. 12: 1 – Captación de calor; 2 - Evaporador (intercambiador de calor); 3 – Compresor que eleva la temperatura del medio frigorífico; 4 – Liquefactor que transmite el calor a la agua de calentamiento; 5 – Circuito de calentamiento; 6 – En la válvula de expansión el medio frigorífico se expande y se refrigera.

Porque en el verano es un refrigerador y en invierno un calentador, el tipo Air-Source Heat Pump (ASHP) es más popular que el SHPS tradicional, pero es 20% menos ecoeficiente en energía que sus análogos. Ambos son más adecuados en climas templados y su compresor necesita de energía eléctrica ^[37, 38]. Los beneficios son generados porque su consumo energético para obtener el calentamiento es más eficiente que la resistencia de la ducha, pero puede ser combinado con un sistema fotovoltaico que garantice suministro de electricidad limpia. Aquí no serán tratadas las múltiples combinaciones posibles de las rutas entre sí, ni con otras tecnologías complementares, sino en su estado puro, para la evaluación aislada, pero un sistema híbrido suma eficiencias ^[38].

A la izquierda de la Fig. 13 está representado esquemáticamente el funcionamiento, en modo calentador, de la bomba de calor reversible; a la derecha, su operación de enfriamiento. Nótese que, en las tuberías cenizas claras, fluye agua fría y, en las cenizas oscuras, la calentada, segundo la dirección indicada por las setas; en la condición de sistema relativamente no conocido, su descripción de funcionamiento será detallada en once etapas operativas.

Figura 13 - Modo de funcionamiento de una bomba de calor reversible



Fuente: Montaje de los autores con imágenes y descripciones de DIMPLEX ^[51]

Descripción de la Fig. 13:

Sistema izquierdo (modo calentador):

1 – El compresor eleva el nivel de presión del medio frigorífico que circula dentro de un circuito cerrado. De este modo sube la temperatura del medio frigorífico gaseoso; 2 - Un intercambiador de calor en el gas caliente del circuito de refrigeración permite la alimentación de diferentes consumidores de calor a un nivel de temperatura más elevado; 3 - Producción centralizada de agua caliente durante la calefacción con temperaturas de alimentación elevadas; 4 - Alimentación de consumidores de calor adicionales mediante amortiguador y/o intercambiador de calor; 5 -

La válvula de conmutación de cuatro vías dirige el medio frigorífico aún caliente al sistema de calefacción donde cede el calor.; 6 - En el licuefactor (intercambiador de calor) el calor se transmite al agua de calefacción. El medio frigorífico se refresca y se licua; 7 - El ventiloconvector es atravesado por agua de calefacción y cede el calor controladamente al aire ambiental. Los ventiladores integrados permiten una circulación del aire con varios niveles de regulación; 8 - Una calefacción de superficie (p.ej. calefacción por suelo radiante) es atravesada por agua de calefacción y cede el calor controladamente al aire ambiental; 9 - En la válvula de expansión el medio frigorífico se expande (caída de presión) y sigue refrescándose; 10 - Un ventilador sopla aire del exterior por el evaporador frío; 11 - Mediante un evaporador (intercambiador de calor) la energía captada en la sonda geotérmica se transmite a un medio frigorífico. El medio frigorífico se calienta y se evapora.

Sistema derecho (modo enfriador):

1 – Mismo que anterior; 2 - Un intercambiador de calor en el gas caliente del circuito de refrigeración facilita el uso del calor perdido producido durante la refrigeración; 3 - Producción eficiente de agua caliente durante la refrigeración usando el calor perdido; 4 - Uso del calor perdido mediante amortiguador y/o intercambiador de calor; 5 - La válvula de conmutación de cuatro vías dirige el calor residual del medio frigorífico al aire exterior, donde cede el calor; 6 - En caso necesario, un ventilador aspira aire del exterior a través del licuefactor caliente para desviar el calor perdido no utilizable; 7 - Mediante un licuefactor (intercambiador de calor) el calor perdido no utilizable se cede al aire exterior. El medio frigorífico se refresca y se licua; 8 - En la válvula de expansión el medio frigorífico se expande (caída de presión) y sigue refrescándose; 9 - En el evaporador (intercambiador de calor) el medio frigorífico frío extrae calor del agua de calefacción; 10 - El ventiloconvector es atravesado por agua de calefacción refrescada y extrae calor del aire ambiental. Temperaturas de alimentación bajas resultan en una temperatura debajo del punto de rocío y en una deshumidificación del aire ambiental. Los ventiladores integrados permiten una circulación del aire con varios niveles de regulación; 11 - El agua refrescada que atraviesa un sistema de tubos instalado en el suelo, en la pared o en el techo refresca la superficie del elemento. Ésta funciona como intercambiador de calor que extrae calor del ambiente. Las temperaturas de alimentación deben ser reguladas de modo que se evite la condensación.

2.4 ECONOMICIDAD Y ECOEFICIENCIA

Es posible calcular el impacto físico, por emisiones de CO₂equivalente t/(kW·h), de la demanda de energía (Tab. 2.2), en las proporciones de la matriz de oferta del NE (25%, termoeléctrica 25%, eólica 30 % y 20% hídrica importada ^[5]), con los factores 86,21 x 10⁻³ para generación hídrica, 752,77 x 10⁻³ para termoeléctrica y 19,66 x 10⁻³ para eólica ^[54]. Considerando que, del estudio de la comisión de alto nivel creada en la conferencia del clima de Marrakesh de 2016, coordinada por J. Stiglitz y N. Stern, el Banco Mundial estimó que, para cumplir el Acuerdo del Clima de París, el precio de la tonelada de carbono debería estar entre US \$ 40 a US \$ 80 en 2020 y US \$ 50 a US \$ 100 en 2030 ^[55] (Finlandia y Noruega vienen realizando pagos superiores a US \$ 50 desde 2015 y la Suecia a US \$ 130) ^[56], tenemos la siguiente Tab. 19, compuesta con los correspondientes impactos de emisiones físicas y de Costes de carbono de la demanda de energía de las rutas, por veinte años, con precios de US \$ 50 = R\$ 159,00 en el cambio de US \$ / R\$ = 3,18 (octubre de 2017). Estos valores son solamente un criterio de elección de rutas.

En la Tab. 2.2 están totalizados, por un período de 20 años, los costes de agua y energía, contables y de oportunidad, bien como sus inversiones totales en el periodo, por sus ciclos de vida útil de 5, 10 y 20 años. Las rutas 4 y 2 presentan una necesidad de inversión inicial destacada, pero la 4 no incurre en Costes de oportunidad de agua ni la 2 de energía; las inferencias que esa Tab. 2.3 permite son importantes, pero no suficientes para elección.

Tabela 2.2 - Costes en créditos de carbono (en 20 años) a precios de cumplimiento del Acuerdo de Paris (tCO₂ = US \$ 50)

SOMATORIO	Resistencia	SCS Convencional	SCS de PVC	SCS de PP	SHPS	ASHP
TOTAL / t	7,042	0,436	0,471	0,498	2,466	3,875
Total / R\$	1.119,75	69,24	74,83	79,20	392,10	616,16
Total / US \$	352,12	21,77	23,53	24,91	123,30	193,76

Fuente: Elaboración del autor.

Tabela 2.3 - Costes acumulados em 20 años (ciclo de vida más largo - SCS Convencional)

Sistema de Calentamiento (<i>r</i>)	1- Resistencia	2 - SCS-C	3a - SCS de PVC	3b - SCS de PP	4a - SHPS	4b - ASHP	
A - Vida Útil / años	5	20	10	10	10	10	
SISTEMA	B - Costo de Adquisición / (R\$)	70,00	5 139,00	450,00	450,00	3 648,69*	2 877,84*
	C - Instalación / (R\$)	30,00	400,00	350,00	350,00	359,12	287,78
	D -Reinversión (20/A)x(B+C) / (R\$)	400,00	5 539,00	1 600,00	1 600,00	8 015,63	6 331,25
	ENERGÍA						
E - Costes Operacionales Totales / (R\$)	18 748,80	1 158,86	1 252,36	1 325,53	6 562,08	10 311,84	
Costo de Oportunidad Operacional Acumulado $\sum (E_r - E_{r \text{ mín}}), n \text{ mín} = 2 /$ (R\$)	17 589,94	-	93,50	166,67	5 403,22	9 152,98	
ÁGUA	F - Costes Operacionales Totales / (R\$)	19 368,00	22 334,40	22 334,40	22 334,40	19 368,00	19 368,00
	G - Costo de Oportunidad Operacional Acumulado $\sum (F_r - F_{r \text{ mín}}), n \text{ mín} = 2 /$ (R\$)	-	2 966,00	2 966,00	2 966,00	-	-

*Para mayor generalidad del análisis, son costes proporcionales a los vigentes para SCS en mercados maduros, e.g., en Australia [38]. En el Brasil, las SHPS y ASHP son tecnologías cuyos Costes están aún afectados por una incipiente demanda y oferta sin significativas economías de escala. Como muestra, la empresa Jelly Fish ofrece bombas de calor (BC) para baño, con fluido refrigerador ecológico, en los siguientes valores y especificaciones: BC120 hot 70 R \$ 19 350,00; BC120 hot 55 R \$ 24 000,00. Subráyese que el hot 70 es capaz de ofrecer agua alrededor de 20°C más caliente que el hot 55 que, en contrapartida, ofrece dos veces más agua calentada en litros [45]. Cotización hecha por correo estatal en 26 octubre 2017. En España las bombas de calor cuestan entre 1,0 y 1,6 mil € \approx R \$ 3,8 mil, precio compatible con la Tab 1.12 del capítulo 01. Los precios relativos mundiales de los sistemas tienden a convergir en el largo plazo (20 años), y esa tabla expresa tal expectativa de los trópicos.

Fuente: Elaboración del autor.

En la Tab. 2.4 están presentados los totales de la Tab. 2.3 en dos pronósticos: el escenario 1 (E1), considerando el despilfarro de agua fría, y el escenario 2 (E2), sin ese evitable descarte:

Tabela 2.4 - Economicidades de las rutas (20 años) – sin efecto invernadero

Sistema de Calentamiento (<i>r</i>)		1- Resistencia	2 - SCS Convencional	3a - SCS de PVC	3b - SCS de PP	4 ^a - SHPS	4b - ASHP
CUSTO TOTAL / (R\$)	E1	58 127,44	38 148,60	29 761,30	29 912,02	44 829,80	50 026,81
	E2	58 127,44	37 707,96	29 320,66	29 471,38	44 829,80	50 026,81
IEE [(N_r máx - N_r) / (N_r máx)], r máx = 1.	E1	0%	34%	49%	49%	23%	14%
	E2	0%	35%	50%	49%	23%	14%
CUSTO DEL BAÑO / (R\$)	E1	0,67	0,44	0,34	0,35	0,52	0,58
	E2	0,67	0,44	0,34	0,34	0,52	0,58

Fuente: Elaboración del autor.

Importa que las rutas 3a y 3b tienen costo de baño equiparable en los dos escenarios (haciendo la aproximación para dos casas decimales); la ruta 2 está detrás de ellas, por \cong 10 centavos a cada calentamiento de agua de 6 minutos; pero, los costes de carbono (Tab. 15) son diferenciados, por lo que pueden ser desempatar por sus contrastantes ecoeficiencias en lo que respecta la emisión de gas de efecto invernadero. En ese punto, la 2 supera la 3a y 3b y las rutas 4 y 1 son de órdenes de magnitud sucesivamente superiores.

A los Costes finales hay que sumar los de CO₂ por baño (Tab. 2.5), aunque en primer momento.

Tabela 2.5 - Costo de CO₂ equivalente por baño con la actual matriz energética de Bahía / R\$

1 - Resistencia	2 - SCS Convencional	3a - SCS de PVC	3b - SCS de PP	4ª - SHPS	4b - ASHP
1,39E-03	8,59E-05	9,28E-05	9,82E-05	4,86E-04	7,64E-04

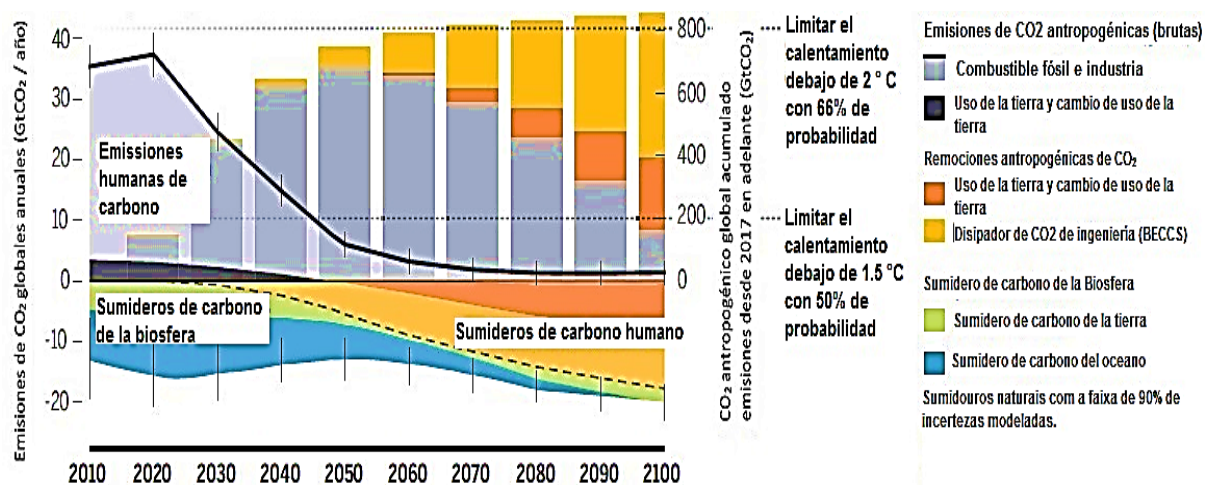
Fuente: Elaboración del autor.

Resulta que los Costes efectivamente pagados por los consumidores de agua calentada son menores que los reales. Por supuesto lo son: no hay instrumentos de presupuesto público o privado de pago por todos los impactos. Así, uno podrá reprochar esa Tab. 2.5 como artificial, pues no hay una ley que la imponga a los baños en el Brasil. Esa es, posiblemente, la contribución de ese artículo, sumarse a los esfuerzos para cambiar tal manera de razonar. En la primera sesión fue tejida una crítica no exhaustiva, aunque lo merezca, de este paradigma común y peligroso. Está calcado en la minimización de coste inmediato, y orientado a hacer elecciones sin pensar bien su externalidad.

Un colectivo de investigadores del Stockholm Resilience Centre, Stockholm University, Future Earth, The Royal Swedish Academy of Sciences, International Institute for Applied Systems Analysis, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Australian-German Climate and Energy College, School of Earth Sciences and University of Melbourne, en artículo de 2017 nombrado “A roadmap for rapid Decarbonization: Emissions inevitably approach zero with a ‘carbon law’”^[29], enfatizaron la necesidad de una disciplina internacional de emisiones, incluso de las principales economías tropicales industrializadas como el Brasil, y su consecuencia fue proyectada hasta fin del siglo XXI (Fig. 14), con escenarios de 66% y 50% de probabilidad de

alcance de calentamiento del planeta de 2°C y 1,5 °C, respectivamente, considerando todo el macrosistema ecológico y social.

Figura 14 - Vía de descarbonización coherente con el Acuerdo de París ^[29]



Obs.: Libre traducción del autor.

Para estos centros de investigación, el escenario de "ley del carbono" de reducir a la mitad las emisiones cada década es ambicioso y depende de la elevación de los sumideros de carbono antropogénicos, de la ingeniería de captura y almacenamiento para estabilizar las temperaturas globales. Con semejante ley, adoptada ampliamente, se puede crear las condiciones esenciales de frontera económica para hacer del futuro de cero emisiones una inevitabilidad, en lugar de ilusiones, agregan ellos; e infieren: la eficiencia energética sólo reduciría las emisiones del 40 al 50% en alrededor de 2030, pero, entre los objetivos exequibles de Marrakech (metas basadas en ciencia) y los compromisos nacionales permanecen inconsistencias alarmantes; las tareas pueden incumplirse por el cortoplacismo y apatía política y el comportamiento imprevisible de las demandas y las ofertas.

Tabela 2.6 - Costes oficiales del baño somados al de cumplimiento del Acuerdo de París (20 Años)

Sistema de Calentamiento (N)	1- Resistencia	2 - SCS Convencional	3a - SCS de PVC	3b - SCS de PP	4ª - SHPS	4b - ASHP
CUSTO ECONÓMICO- E1	0,69	0,44	0,35	0,35	0,52	0,59
ECOLÓGICO / (R\$) E2	0,69	0,44	0,34	0,34	0,52	0,59

Fuente: Elaboración del autor.

$$I_{EE_r} = \left\{ w - \frac{(I_r)^{\frac{k}{\alpha}} + \sum_{n=1}^k [(C_{o_n}^r - C_{o_n}^{min}) + C_{o_n}^r + D_{r_n} + C_{c_r_n}]}{86\,400} \right\} w^{-1} \quad (4)$$

El algoritmo de la ecuación 4 expresa, como primera aproximación, un *Índice de Economicidad-Ecoeficiencia* de una ruta cualquiera r , I_{EE_r} , donde se relacionan los costes contables, los económicos (o de oportunidad) y los ambientales, en términos de CO₂ equivalente (pero hay otros más, incluso después del Ciclo de Vida de los sistemas), en que I_r es el la inversión (adquisición y instalación del sistema), ponderada por la razón k/α donde α es el Ciclo de Vida (CV) de la tecnología r , en años (n) y k es el CV de la ruta más duradera (SCS Convencional, determinante del límite superior del sumatorio); C_o^r es el costo operacional anual de r , en términos de agua y energía, subrayado del costo operacional de la alternativa tecnológica más barata, C_o^{min} , indicando su costo de oportunidad, que podría ser medido por sus usos alternativos; O_r y D_r son, respectivamente, las sumas de los costos y despilfarros anuales de agua y energía de la ruta r ; los costes anuales de créditos de carbono son C_{c_r} que vinculan la demanda con la oferta de energía, considerando las porcentajes de las modalidades tecnológicas de la matriz de generación de la región y local [57]; por fin, w es el costo económico-ecológico del baño más caro (Tab. 2.6), generando la Tab. 2.7:

Tabela 2.7 - Jerarquización per el Índice de Eficiencia Económico-Ecológico – con efecto invernadero

Sistema de Calentamiento (r)	1- Resistencia	2 – SCS-C	3a - SCS de PVC	3b - SCS de PP	4 ^a - SHPS	4b - ASHP
I_{EE_r} - E1	0%	35%	50%	49%	24%	15%
E2	0%	36%	50%	50%	24%	15%

Fuente: Elaboración del autor.

Sin embargo la ecuación 4 esté calibrada por el perfil empíricamente dado de la familia, se puede cambiarla, alterando el denominador de la razón, que encarna el número de calentamientos anuales.

Por ese I_{EE} los empates económicos no fueron dilucidados de todo, aunque la eficiencia se mezcló con las ecoeficiencias hídrica y energética, conectando oferta-demanda como un macrosistema ecológico con entradas y salidas conexas. Siguen pareados el SCS de PVC y de PP, todavía distinguibles por el beneficiario o consultor por criterio de su coste de CO₂ o por

Costes Operacionales Totales y/o de Oportunidad con energía, en todos los tres casos con superioridades para el de PVC.

2.5 CONSIDERACIONES FINALES

Consideradas las irradiaciones tropicales de los escenarios sobre los cuales este estudio se debruzó, más particularmente en el ambiente económico soleado del NE brasileño y, en su bojo, de la Bahia, la hipótesis inicial de que la economicidad no conforma un criterio suficiente, aunque relevante y imprescindible, para la toma de decisión de qué ruta tecnológica adoptar para calentar agua, está confirmada por dos razones: 1) la verificación experimental de unos costes de calentamiento equivalentes o cercanos, en hasta dos casas decimales y 2) porque las economías de los pagos de los demandantes finales no compensan los Costes agregados de las externalidades hídrica, energética y de emisiones de gases de efecto invernadero debidos a la oferta en el macrosistema ecológico.

Los despilfarros de agua de los SCS son evitables con medidas sencillas como 1) el aislamiento térmico de las tuberías conductoras del agua, mitigando la pérdida del calor; 2) la reservación del agua fría para otros usos domésticos; 3) un cambio de comportamiento de la familia, que pode pasar a hacer uso sucesivo del sistema, para que no tome tiempo hasta que el agua de la tubería se enfríe y, por fin, 4) con una pequeña bomba de circulación de agua, similar a que hay en los acuarios, de bajo costo y alimentada por energía fotovoltaica. Arrostrando esas soluciones, el escenario 2 no es un ejercicio abstracto o heroico, sino una posibilidad real y una necesidad. Todavía, el escenario 1 inspira inquietudes y ha sido un malo pronóstico de la elección de las rutas 2.

En lo que respecta a los créditos de carbono, aunque los precios de la tonelada sean hoy variables y los trópicos, incluso el Brasil, a menudo no los tengan regulados por ley, son contabilidades preocupantes día tras día, desde el Acuerdo de Paris. No se ha hecho acá la simulación de impactos con todo el espectro de precios recomendados por los especialistas del Banco Mundial, pero su sumatorio en dos décadas, en escalones mínimos, fue ya perturbadora: generó Costes superiores a los pagos en efectivo por cada calentamiento y, todavía, hay más

costes de externalidades a considerar, en una segunda aproximación, cuenta aquí ahorrada a otras investigaciones.

Al algoritmo dibujado, como prototipo de cálculo que relaciona Costes contables, económicos y ambientales, tuve la finalidad de ser lo más sencillo y funcional posible, además, convergente con experimentos. Sus resultados son la expresión de los Costes totales de calentamiento, cuando atendidas las metas de Marrakech.

La jerarquización final, en orden decreciente de elección de los sistemas o rutas, considerando que esta incidirá no solamente en la cadena de la demanda, sino en un macromodelo con la oferta y la ecología (escenario 2), considerando el efecto invernadero, fue ésta:

- 1º) SCS de bajo costo de Policloreto de Vinilo, pareado con de Polipropileno, con $I_{EEr} = 50\%$;
- 2º) Sistema de Calentamiento Solar (SCS) Convencional, con $I_{EEr} = 36\%$;
- 4º) Solar Heat Pump Systems, con $I_{EEr} = 24\%$ y
- 5º) Air-Source Heat Pump, con $I_{EEr} = 15\%$.

Considerando las incertidumbres implicadas, los decimales fueron quitados de esa jerarquización como cifras no significativas, por lo que los sistemas solares de bajo coste están técnicamente empatados. Pero, como subrayado, por el criterio de la eficiencia energética bruta o de oportunidad, y por el efecto invernadero, el sistema con placa de policloruro de vinilo supera el con placa de polipropileno. La ruta 1 quedó en último, con $I_{EEr} = \text{cero}$, en todos los escenarios, y eso se explica por ser la elección energéticamente más ineficiente.

REFERENCIAS²¹

- [1] - GEORGESCU-ROEGEN, N. (1971). **The entropy law and the economic process**. Cambridge: Harvard University Press.
- [2] - FURTADO, C. (1996). **O Mito do Desenvolvimento Econômico**. São Paulo: Paz e Terra.
- [3] - ANDRADE, D. (2008). Economia e meio ambiente: aspectos teóricos e metodológicos nas visões neoclássica e da economia ecológica. **Leituras de Economia Política**, (14): 1-31, ago.-dez.
- [4] - ROPKE, I. (2004). The early history of modern ecological economics. **Ecological Economics**, v. 50, p. 293-314.
- [5] - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. (2017). **Históricas da Operação - Geração de Energia**. Disponível em http://www.ons.org.br/historico/geracao_energia.aspx. Consulted 14-04, 2017.
- [6] - PEREIRA, M.; DOS SANTOS, C. (2015). Protótipo de um sistema de aquecimento de água para população de baixa renda usando energia solar e elétrica, com reaproveitamento de calor. **ForScience**, v. 3, n. 2, p. 56-72.
- [7] - DE JONG, P. (2017). **Forecasting, integration, and storage of renewable energy generation in the Northeast of Brazil**. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PEI), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- [8] - DE JONG, P. (2013). **Economic, technical and environmental analysis of renewable and non-renewable electricity generation technologies in Brazil**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PEI), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- [9] - DE JONG, P.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. (2015). Economic and environmental analysis of electricity generation technologies in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 725-739.
- [10] - ACHÃO, C.; SCHAEFER, R. (2004). Energia e classes de renda no Brasil: um retrato do consumo no setor residencial. In: **X Congresso Brasileiro de Energia**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ-SBPE-CE.

²¹ Foi conservada a normatização das referências da publicação de destino, com fontes numeradas entre colchetes e ano de publicação entre parêntesis após o(s) nome(s) do(s) autor(es).

- [11] - DE SOUZA, L.; BEZERRA, J. (2000). Sistema Alternativo de Aquecimento Solar. **Anais**, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Brasil, Natal, RN.
- [12] - BOSCOLI, M. (2010). **Usuários de habitação de interesse social e adoção de sistema de aquecimento solar de água**: estudo de caso em Londrina-PR. 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina.
- [13] - STERN, N. (2007). The Economics of Climate Change, **The Stern Review**. Cambridge University Press, Cambridge.
- [14] - ROCKSTRÖM, J. et al. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. **Ecology and Society**, In Press 14th September.
- [15] - ROCKSTRÖM, J. et al. (2009). A safe operating space for humanity. **Nature**, vol 461 (24), September.
- [16] - WORKING GROUP ON THE 'ANTHROPOCENE' (WGA). (2009). **What is the 'Anthropocene'?**: current definition and status. Publicado em 2009. Disponível em: <http://quaternary.stratigraphy.org/workinggroups/anthropocene/>. Consulted 7-8, 2017.
- [17] - CORNELL, S. (2009). Response to Rockström et al. (Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity): On the System Properties of the Planetary Boundaries. **Ecology and Society** 17(1): r2.
- [18] - MORRIS, S.; GOLDSTEIN, G.; FTHENAKIS, V. (2002). NEMS and MARKAL-MACRO Models for Energy-Environmental-Economic Analysis: A Comparison of the Electricity and Carbon Reduction Projections. **Environmental Modeling & Assessment**, September, Volume 7, Issue 3, pp. 207–216.
- [19] - MURPHY, R.; JACCARD, M. (2011). Energy efficiency and the cost of GHG abatement: A comparison of bottom-up and hybrid models for the US. **Energy policy**, v. 39, n. 11, p. 7146-7155.
- [20] - RÜCKERT, F. (2015). **O ambientalismo em três escalas de análise**. Cadernos IHU. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
- [21] - SAFONOV, P.; COMAR, V.; ORTEGA, E. (s.d.). **Modelagem do Brasil**: cenários para o desenvolvimento. UNICAMP. Disponível em: www.unicamp.br/fea/ortega/livro/c06-brasil-sco.pdf. Consulted 10-9, 2017.
- [22] - SARICA, K.; TYNER, W. (2016). Economic impacts of increased US exports of natural gas: An energy system perspective. **Energies**, v. 9, n. 6, p. 401.
- [23] - SARICA, K.; TYNER, W. (2013). Alternative policy impacts on US GHG emissions and energy security: a hybrid modeling approach. **Energy Economics**, v. 40, p. 40-50.

- [24] - TRAYNOR, G. et al. (1989). **Macromodel for assessing residential concentrations of combustion-generated pollutants**: Model development and preliminary predictions for CO, NO/sub 2/, and respirable suspended particles. Lawrence Berkeley Lab., CA (USA).
- [25] - KO, F. et al. (2010). Long-term CO 2 emissions reduction target and scenarios of power sector in Taiwan. **Energy Policy**, v. 38, n. 1, p. 288-300.
- [26] - WENYING, C. (2005). The costs of mitigating carbon emissions in China: findings from China Markal-Macro modeling. **Energy Policy**, Vol.33(7), pp.885-896.
- [27] - RICARDO, D. (1965). **Princípios de economia política e de tributação**. Portugal: Fundação Calouste Gulbenkian.
- [28] - STEFFEN, W.; CRUTZEN, P.; MCNEILL, J. (2007). The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of Nature? **Ambio**, 36, 614-621.
- [29] - ROCKSTROM et al. (2017). A roadmap for rapid Decarbonization: Emissions inevitably approach zero with a “carbon law”. *Science*, march, vol 355.
- [30] - BAHIA. Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (Coelba). (2017). **Tabela de Tarifa e Preço Final de Energia Elétrica**. Resolução 2.222 de 22 de abril de 2017.
- [31] - BAHIA. Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. (Embasa). (2017). **Tarifas**. Disponível em: <http://www.embasa.ba.gov.br/centralservicos/index.php/tarifas>. Acesso em: 06 jul. 2017.
- [32] - PEREIRA, E.; MARTINS, F.; ABREU, S.; RÜTHER, R. (2006). **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE.
- [33] - IMPERIAL, L.; PEREIRA, O. (2014). Análise do potencial do recurso solar na Bahia a partir de software de informação geográfica baseado na web. V Congresso Brasileiro de Energia Solar (V CBENS), **Anais**, Recife/PE.
- [34] - CENTRO INCUBADOR DE EMPRESAS TECNOLÓGICAS - CIETEC. (2009). **Manual de Instrução de Manufatura e Instalação Experimental do Aquecedor Solar de Baixo Custo**. São Paulo: CIETEC.
- [35] - SÃO PAULO. (2017). Universidade de São Paulo - USP. **CIETEC Incubadora de Empresas Tecnológicas – São Paulo**. Disponível em: <http://www5.usp.br/servicos/incubadora-de-empresas-tecnologicas-sao-paulo/>. Acesso: 06 ago. 2017.
- [36] - JURADO, D. (2004). **Modelagem dinâmica de um sistema solar termo-sifão usando coletores atmosféricos de plástico**. Dissertação (Mestrado) - FEMEC-UFU, Uberlândia.

- [37] - KIM, M.; KIM, MS.; CHUNG, JD. (2004). Transient thermal behavior of a water heater system driven by a heat pump. **International Journal of Refrigeration**, 27:415–21
- [38] - HEPBASLI, A.; KALINCI, Y. (2009). A review of heat pump water heating systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 13, 1211–1229.
- [39] - CHOW, T.T.; FONG, K.F.; PEI, G.; JI, J.; HE, M. (2010). Potential use of photovoltaic-integrated solar heat pump system in Hong Kong. **Applied Thermal Engineering**, Vol. 30(8), pp.1066-1072.
- [40] - LAIPRADIT, P.; TAINSUWAN, J.; KIATSIRIROAT, T.; AYE, L. (2008). Theoretical performance analysis of heat pump water heaters using carbon dioxide as refrigerant. **International Journal of Energy Research**, 32:356–66.
- [41] - LU AYE, W.; CHARTERS, S.; CHAICHANA, C. (2002). Solar Heat Pump Systems for Domestic Hot Water. **Solar Energy** Vol. 73, No. 3, pp. 169–175.
- [42] - ZHANG, J.; WANG, RZ; WU, JY. (2007). System optimization and experimental research on air source heat pump water heater. **Applied Thermal Engineering**, 27:1029–35.
- [43] - SIQUEIRA, D. (2009). **Estudo de desempenho do Aquecedor Solar de Baixo Custo**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [44] - JELLY FISH. (2017). **Energia Solar – Solar Banho**. Disponível em <http://jellyfish.com.br/produtos/produtos-energia-solar/produto-solar-banho/>. Consulted 7-8, 2017.
- [45] - JELLY FISH. (2017). **Bombas de Calor – Hot 55/70 (Banho)**. Disponível em <http://jellyfish.com.br/produtos/produtos-energia-solar/produto-solar-banho/>. Consulted 7-8, 2017.
- [46] - SOLICLIMA. (2017). **Heat Pump**. Disponível em: http://www.soliclma.com/en/heat_pump.htm Consulted 7-8, 2017.
- [47] - SOLETROL. (2017). **Aquecedor Solar**. Disponível em <http://www.soletrol.com.br/produtos/> Consulted 7-8, 2017.
- [48] - ANDERSON FLOOR WARMING AND RENEWABLES. (2017). **Air source heat pumps**. Disponível em <http://www.andersonfloorwarming.co.uk/heating/heat-pumps/air-source-heat-pumps/> Consulted 7-8, 2017.
- [49] - NIBE Energy Systems. (2017). **Air Source Heat Pumps**. Disponível em <http://www.nibe.co.uk/> Consulted 7-8, 2017.

- [50] - DIMPLEX. (2017). **Detalles técnicos: Bomba de calor.** Disponible en <http://www.dimplex.de/es/profesional/detalles-tecnicos/bombas-de-calor/el-funcionamiento-de-una-bomba-de-calor.html> Consulted 7-8, 2017.
- [51] - DIMPLEX. (2017). **La bomba de calor reversible.** Disponible en <http://www.dimplex.de/animationen/kreislauf2.php?lang=es> Consulted 7-8, 2017
- [52] - BORGES, T. (2009). **Síntese Otimizada de Sistemas de Aquecimento Solar de Água.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [53] - LIMA, J. (2003). **Otimização de sistema de aquecimento solar de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa TRNSYS.** Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [54] - MIRANDA, M. (2012). **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- [55] - CHIARETTI, D. (2017). **Preço do carbono tem de saltar para cumprir acordo do clima, diz estudo.** Valor Econômico. Edición 29 mayo 2017. Disponible en <http://www.valor.com.br/internacional/4984338/preco-do-carbono-tem-de-saltar-para-cumprir-acordo-do-climadiz-estudo> Consulted 21-9, 2017.
- [56] - SEQUESTRAR CARBONO. (2017). **O Mercado de Carbono no Mundo – Preço do CO₂ – Credito de Carbono.** Disponible en <https://sequestrarcarbono.com/2017/03/22/o-mercado-de-carbono-no-mundo-preco-do-co2/>. Consulted 21-9, 2017.
- [57] - DINATO, R. M. et al. Influência da matriz elétrica na adaptação de inventários de ciclo de vida para o cenário brasileiro. **Anais**, IV Congresso Brasileiro Sobre Gestão pelo Ciclo de Vida, São Bernardo do Campo – SP, Brasil, novembro de 2014.

3 WATER HEATING SYSTEMS FOR TROPICAL HOMES: A INDEX OF ECONOMICITY AND ECO-EFFICIENCY²²

Rilton Primo^a, José Rodríguez^b, Marcelo Silva^c, Pieter de Jong^d, Daniel Kouloukoui^e, Felipe Cunha^f, Karla Esquerre^g and Ricardo Kalid^h

^a Program in Industrial Engineering of the Universidade Federal da Bahia (PEI/UFBA), Salvador, Brazil, rilton@ufba.br

^b Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, México, jfgr55@hotmail.com

^c Federal Institute of Education of the Bahia, Salvador, Brazil, profmarceloifba@gmail.com

^d PEI/UFBA, Monash, Austrália, pieterj@ufba.br

^e PEI/UFBA, Lomé, Togo, danielk@ufba.br

^f Interdisciplinary Center for Energy and Environment of UFBA, Salvador, Brazil, fbarroco@bmeg.com.br

^g PEI/UFBA, Salvador, Brazil, karlaesquerre@ufba.br

^h Federal University of South Bay, Itabuna, Brazil, ricardo.kalid@gmail.com

ABSTRACT

Experiments with alternative heating systems for residential purposes, replacing or alternating with heating element, have been carried out in the USA, China, Australia and Brazil, among other macro-systems. These changes occur not only with the objective of increasing economic efficiency, water and energy of these demands but also with the purpose of mitigating the impacts of the supply. Water and energy crises have stimulated the combination of economic and environmental criteria in decision-making on technological methods that imply water and energy flows, but the analyzes are not always integrated. Due to the identification of economic equivalences or areas of indifference, in the long term (20 years), for some heating systems, regarding direct and indirect accounting and opportunity costs, paybacks and life cycles, in a given tropical economic environment, this study aimed at creating and applying an algorithm capable of combining the analysis of the economics of these systems with the evaluation of their ecoefficiency, in a single index, hierarchizing them, the main contribution of this study. The analysis reviewed experiments, simulations and noted the relative efficiency of systems in different solar irradiances. In descending order from the highest environmental impact to the lowest, the evaluated heating systems were allocated as: 1°) Low cost Solar Heating Systems of Vinyl Polychloride (SHS-VPC) and of Polypropylene (SHS-PP), with Index of Economicity and Eco-Efficiency (IEEr) = 50%; but, by the criterion of energy efficiency and greenhouse gas emissions, the SHS-VPC exceeds the SHS-PP; 2°) SHS Conventional, with IEEr = 36%; 4°) Solar Heat Pump Systems (SHPS), with IEEr = 24% and 5°) Air-Source Heat Pump (ASHP), with IEEr = 15%. The electric shower turned out to be: a) the system less energy efficient; b) the system that has the greatest ecological impact and c) the most costly system over the life cycles of alternatives.

Keywords: Heat Pumps, Index of Economicity and Eco-Efficiency, Solar Heating Systems.

3.1 INTRODUCTION

Experiments, studies and installations of solar heating systems, heat pumps or hybrid systems have been a global trend for heating water in homes and midsize units (hotels, quarters, day care centers and schools), replacing the use of electric heating pure.

²²Artigo completo aprovado para publicação na *The 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2018)*, entre 17 e 22 de junho de 2018, em Guimarães, Portugal. Resumo aprovado pelo Comitê Científico do XI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (CBPE), entre 11 a 14 de setembro de 2018, Cuiabá, MT, Brasil.

In US states such as Florida, the method of electric water heating is used in more than 80% homes, although in the US as a whole this percentage is approximately 40%, representing an average of 17% of residential energy consumption, but reaching up to 25% in states such as California ^[1]. In recent decades, China has experienced a strong and persistent increase in the number of households requiring water heated with electricity ^[2, 3]. In Australia, the use of electricity to heat water represents more than 40% of the energy consumption of a typical home ^[4]. In 2004 almost 97% of Brazilian households ^[5] used electric showers, spending 22.8% of the income of those earn up to 2 minimum wages (average consumption of 20.3 kWh/household/month) ^[6].

Currently, electric showers use around 40% of the energy demand in dwellings of the poor in Brazil ^[7], at a high cost. Both Brazil and Australia, the US and China, among many other countries, today are researching alternative technological methods of water heating. The US plans to save 50-80% of the more than 120 GWh / yr spent on heating element by installing solar heating systems on the roofs of homes ^[8]. The Chinese have also been researching solar alternatives as well as temperate and tropical countries, due to their higher incidence of irradiation. Large tropical countries such as Brazil study and test alternative methods, such as conventional or low-cost solar heating systems, heat pumps and hybrid systems.

The reasons for the use of electric showers, where it has been used on a large scale, are obvious: low cost and cheap maintenance (replacement of heating element), it heats water fast and does not waste water. Waste may occur with the discharge of cold water from the plumbing system until the warm water arrives from the thermal reservoir on the roof to the bathroom. Although hydrically efficient, the use of an electric element to heat water uses a considerable amount of energy (including that generated from non-renewable sources) and is dependent on external supply which at peak times can overload transmission systems. The eco-efficiency of this method has drawn the attention of different studies. ^[9-26].

Solar Heating Systems SHS have two modalities, the gatherer with plaque built with Polyvinyl Chloride (PVC) and Polypropylene (PP). There is another conventional type SHS which is already manufactured in Brazil, and will be compared, for its economy and eco-efficiency, with these two low-cost predecessors. In addition, although not very widespread in the tropics, and in Brazil, will be evaluated for Heat Pumps (HPS), also in two modalities: 1) a exclusively

made to heat (SHPS) and 2) the so-called "air-water", with flex heat/cool, which takes advantage of the outside space as a source of energy throughout the year (ASHP).

The demand for electricity for hot water baths increases the emission of greenhouse gasses, according to the energy matrix of the region. In this case, 25% of the energy is offered by thermoelectric plants and this has proved to be unsustainable.^[27] Assessments of the economic feasibility of heating methods have proved inconclusive for their choice, especially in cases of equivalent or indifferent economics. Local paybacks and degrees of irradiation^[33] generate long-term indecision about economic efficiencies (20 years), considering the water and energy prices, direct costs, environmental externalities and impacts after the life cycle^[28-30] for the tropical case studied (Bahia State, Northeast Brazil)^[31-33]. The water and energy efficiency of the alternative heating methods are disparate and combined.

The contribution of this work is to offer an algorithm capable of assisting the decision making of local choice of heating systems^[34-52] for their combined economies and efficiencies.

3.2 DISCUSSION - CHARGE CAPACITY AND ALTERNATIVES CBA

It is pointed out that the traditional "economics-science" has neglected much the connections between the ecological system and the activities of production and consumption that represent the crux of the "economy-activity"^[53]. Indeed, it is not uncommon for economic models to still treat environmental constraints as extrinsic, or for environmental economics to be considered as a branch of microeconomics, focused on balancing prices for optimum resource allocation with maximum benefit and minimal cost. A "macroeconomy of the environment", in which the "charge capacity" of the system at a given moment plays a key role, would help to delimit the scope of sustainable development and lead to the realization of "perpetual growth", confused with "Sustainable growth".^[53]

The ecological economy is attentive to the cumulative ecosystemic impact of systems towards ecosystem boundaries. In this sense, the 21st century has contributed to the state of the art in the second half of the twentieth century, where observers from the London Environmental Economics Center, International Institute for Environment and Development and University College indicated that efforts to "operationalize" a sustainability in valuation methods for practical decision-making were insufficient and generally "non-persuasive" as to the need to

restrict the depletion and degradation of the stock of natural capital, and whose resulting optimum differed from the "efficient optimum of the cost-benefit criterion conventional." [54]

CBA's recurring applications for investment decision-making, as opposed to investments in the capital market, have generated the general tendency to shape it in each of its components in the manner of compound interest²³ or in the manner of a geometric progression around the so-called Social Discount Rate (SDR)²⁴, financial models for which the socio-environmental physical limits are exogenous variables. The following is a brief critique of the tendency to shape these computations, from the choice of the components of the variables, to the fashion of compound interest or geometric progressions around the so-called SDR.

There are multiple ways of comparing the advantages of alternative uses of resources in view of their economic and external impacts, with specific purposes - social, environmental, economic, competitive, administrative, among others [55-59] -, options that aggregate or exclude certain variables from the computation process and recalculate them, such as the Incremental Cost-Benefit Ratio method, better known as the Cost Benefit Index (CBI) [60]. Rigorously, each case and purpose would require its own CBA analysis.

Although at the end of the twentieth century some authors have come to consider a disadvantage the large number of versions of CBAs, as well as their sensitivity to criteria of choice of variables components and available calculation techniques [61, 62], these versatilities have responded, in counterweight, by their ability to adjust to overflows and crises, sudden mutations, specific situations and georeferenced.

Recently it was pointed out as a limitation of the Sustainability Reports of the companies Vale do Rio Doce S.A and Portugal Telecom S.A, the best of the year²⁵, do not provide data for an CBA [63]. The CBA itself, given the eco-efficiency criteria, has some limitations [64, 65].

²³ The compound formula is $M = C_{t=0} (1+i)^t$ where M is the final amount, i the interest rate; $C_{t=0}$ is the capital or initial value and t is the total time.

²⁴ E.g. $B = \sum_{t=0}^{t=n} \frac{Bt}{(1+r_s)^t}$ where B is the sum of the benefits discounts until $t = n$ and r_s is said SDR, arbitrated at compound interest.

²⁵ They were rated by the Global Reporting Initiative (GRI) as Application Level A +, which indicates that the firm met the disclosure requirements of the sustainability actions and submitted it to external verification and assurance

In its theoretical-economic matrix, the Cost-Benefit Analysis goes back to the French tradition and this to the study of J. Dupuit (1844) entitled *On the Measurement of the Utility of Public Works*, but the current CBA is a decision-making guide derived from different theoretical and even anti-theoretical (empiricist) currents, as in its origins in the USA, when it was only a federal administrative device, nothing due to economic theories^[66]. New theorizations update CBA^[67].

Generally speaking, equation 1 is the synthetic form of the Cost-Benefit Ratio (R_{CB}), by which the as R_{CB} are hierarchized and values where it is advantageous ($R_{CB} > 1$), is indifferent ($R_{CB} \approx 0$) or undesirable ($R_{CB} < 1$):

$$R_{CB} = \frac{B - C}{I} \quad (1)$$

Where B are the benefits, C are the costs and I the investments. In this type of approach, one of the methodological challenges is to quantify the value or simply allocate monetary amounts (price/cost) to physical or intangible units of measure^[59]. These estimates are useful for evaluating, for example, positive and negative environmental externalities and their impacts. Thus, for the calculation steps it is cautious to consult experts, stakeholders and shareholders. In this care, however, there remains a risk: reuse the conceptual matrices of decisions that have induced the impact. E.g., the experiment of treating biophysical scenarios with capital market formulas ignored critical boundaries. In this case, renovatory approaches can arise from optional estimation logics and non-financial mathematics. Even the ecological economy revises its paradigms^[68,69].

For late-century neoclassical economists^[70,61] (Cf. Quadro 3.1), in an ACB, for a decision taken on an ecologically promising investment, it would be useful to calculate or "social price of capital". Translation: it is the cost that the investment causes in the capital market, when capturing resources in it. Thus, any investment of resources will imply raising interest rates and making investments unfeasible, as well as a greater propensity to save, so that sustainability needs can only be met at the expense of deferred investments and additional savings. This is called "monetarism" or "neoclassicism".

For neoclassical environmental economics, the social cost of investment, with an ecological end, is equalized by the marginal rate of productivity of capital as measured by the rate of return

of the economy, and the social capital price ratio (also called the SDR) is governed by the ratio between that leveling and the market cost of capital, i.e., interest. No wonder that the formula that conventional CBAs use to measure variables are inverse from capitalization:

$$P_s = \frac{\left(\sum_{t=0}^{t=n} \frac{B_t}{(1+r_s)^t} \right) - \left(\sum_{t=0}^{t=n} \frac{C_t}{(1+r_s)^t} \right)}{\left(\sum_{t=0}^{t=n} \frac{I_t}{(1+r_s)^t} \right)} \quad (2)$$

where, from time 0 to $t = n$, B is the sum of the discounted benefits, C the discounts of current, I the investment expenses, and r_s is the SDR, generating the Profitability Coefficient (P_s) [58]. Useful to decision-making about what is most profitable, Equation 2 can induce non-ecological choices, even when considering positive environmental externalities as benefits, since 'natural capital' does not exist in nature and is finite.

Quadro 3.1 - Differences of focus between the ecological economy and the neoclassical environmental economy [71].

Ecological Economics	Neoclassical environmental economics
Great Scale	Optimal allocation and externalities
Priority to sustainability	Priority to efficiency
Satisfaction of basic needs and equitable distribution	Optimum Welfare or Pareto Efficiency
Sustainable development (global and North/South)	Sustainable growth in abstract models
Pessimism about growth and the existence of difficult choices	Optimism regarding growth and existence of "win-win" options
Unforeseen coevolution	Deterministic optimization of intertemporal well-being
Long-term focus	Focus on the short and medium term
Complete, integrative and descriptive	Partial, monodisciplinary and analytical
Concrete and specific	Abstract and general
Physical and biological indicators	Monetary indicators
Systemic analysis	External costs and economic valuation
Multidimensional evaluation	Cost-benefit analysis
Integrated models with cause and effect relationships	General equilibrium applied models applied to external costs
Rationality of individuals and uncertainty	Maximization of utility and profit
Local communities	Global market and isolated individuals
Environmental ethics	Utilitarianism and functionalism

This idea inspired pioneering studies such as those of A. Dagsputa [72] and of him with D. Perce [73], for whom the starting point of the CBA would be precisely the consideration that "commercial profitability may not be the appropriate criterion for evaluating a project", but asserts that "rejection of commercial profitability does not imply that the concept of profitability itself is rejected" [72, 74-87].

3.3 HIERARCHIZATION INDEX

The algorithm of the equation (3) expresses an *Index of Economicity and Eco-efficiency* of a path any r , I_{EEr} , where they relate to accounting costs, the economic (or opportunity) and the environmental, in terms of CO₂ equivalent, in which I_r is the investment (acquisition + installation + maintenance of the system), weighted by the reason k/α where α is the cycle of life of the technology r , in years, and k is the cycle of life of the rote more durable (20 years, $r = 2$); C_{or} it is the annual operational cost of r , in terms of water and energy, subtracted of the operational cost of the cheapest alternative technology $C_{or_{min}}$, difference indicative of your opportunity cost, which could be measured by its alternative uses; D_r is the amounts of annual wastage of water of the route r ; the annual costs of carbon credits of route r are C_{cr} , linking demand with supply of energy, considering the percentages of the modalities technological of generation matrix local; w is the ecological-economic cost of the bathroom more expensive:

$$I_{EEr} = \left\{ W - \frac{(I_r) \frac{k}{\alpha} + \sum_{n=1}^k [(C_{or} - C_{or_{min}})_n + (C_{or} + D_r + C_{cr})_n]}{86\,400} \right\} W^{-1} \quad (3)$$

The constant 86 400 in the denominator can be calibrated according to the specific case, since it corresponds to the accumulated number of baths, during the life cycle of the longest technological route (20 years), required for a family of four, who take three baths per day, of six minutes each, with standard shower and half-open registration (5 L / minute), which make up the daily consumption of 360 L, which is approximately 11 m³ / month, considering, by approximation, the month as of 30 days (86 400 = persons in family x bath per day x days per month x month per year x years of route longest).

The others input data were calculated by the authors in the previous study [88] and are summarized in Tab. 3.1, with prices prevailing in Bahia (northeastern of Brazil) at the exchange rate of February 9, 2018 (1 US \$ = R \$ 3,281). In scenario 1 (S1), there is waste of water in solar heating systems; but, in scenario 2 (S2), measures are taken to eliminate water waste.

Table 3.1 - Synthesis of economics and eco-efficiency in 20 years (two scenarios and northeast irradiation $\cong 5,4 \text{ kW/m}^2$ in average year)

Technology (r)		1 - Electric Shower	2 – SHS Conventional	3a - Low cost SHS of Vinyl Polychloride	3b - Low cost SHS of Polypropylene	4a – SHPS	4b – ASHP		
Cost of the SYSTEM = Acquisition + Installation + Maintenance + Reinvestment / (US\$)	R\$	1 300,00	11 179,88	2 600,00	2 600,00	13 103,44	10 576,87		
	US\$	396,22	3 407,46	792,44	792,44	3 993,73	3 223,67		
ENERGY Expenditures / (US\$)	Gross Costs	R\$	18 748,80	1 158,86	1 252,36	1 325,53	6 562,08	10 311,84	
		US\$	5 714,36	353,20	381,70	404,00	2 000,02	3 142,90	
	Opportunity cost	R\$	17 589,94	-	93,50	166,67	5 403,22	9 152,98	
		US\$	5 361,15	-	28,50	50,80	1 646,82	2 789,69	
	Greenhouse effect CO₂eq = t/(kW·h)	R\$	1 119,75	69,24	74,83	79,20	391,91	615,86	
		US\$	341,28	21,10	22,81	24,14	119,45	187,70	
WATER Expenditures / (US\$)	S 1	R\$	14 137,98	16 528,51	16 528,51	16 528,51	13 560,96	13 560,96	
		US\$	4 309,05	5 037,64	5 037,64	5 037,64	4 133,18	4 133,18	
	S 2	R\$	14 137,98	13 560,96	13 560,96	13 560,96	13 560,96	13 560,96	
		US\$	4 309,05	4 133,18	4 133,18	4 133,18	4 133,18	4 133,18	
	Opportunity Cost (S1)	R\$	577,02	2 967,55	2 967,55	2 967,55	-	-	
		US\$	175,87	904,47	904,47	904,47	-	-	
	Opportunity Cost (S1)	R\$	577,02	-	-	-	-	-	
		US\$	175,87	-	-	-	-	-	
	Total Cost / (US\$)	S 1	R\$	52 353,74	31 834,81	23 441,92	23 588,26	38 629,70	43 602,65
			US\$	15 956,64	9 702,78	7 144,75	7 189,35	11 773,76	13 289,44
S 2		R\$	52 353,74	25 899,70	17 506,82	17 653,16	38 629,70	43 602,65	
		US\$	15 956,64	7 893,84	5 335,82	5 380,42	11 773,76	13 289,44	
Cost of the Bath / (US\$)	S 1	R\$	0,62	0,37	0,27	0,27	0,45	0,51	
		US\$	0,19	0,11	0,08	0,08	0,14	0,16	
	S 2	R\$	0,62	0,30	0,20	0,21	0,45	0,51	
		US\$	0,19	0,09	0,06	0,06	0,14	0,16	

Source: Author's elaboration.

3.4 RESULTS

In decreasing order by ranking of algorithm created, considering scenario 2 (no water wastage) and the costs of the greenhouse effect were:

- Paired on 1st) Low cost SHS of Vinyl Polychloride and SHS of Polypropylene, with EEI = 50%;
- 2nd) Solar Heating System (SHS) Conventional, with EEI = 36%;

- 3th) Solar Heat Pump Systems (SHPS), with EEI = 24% and
- 4th) Air-Source Heat Pump (ASHP), with EEI = 15%.

Considering the decimals as non-significant numbers, given the uncertainties involved, low-cost solar systems are technically tied and, using the water efficiency tie-breaker, are still equivalent; but by the criterion of energy efficiency or greenhouse effect, the Low cost SHS of Polypropylene (LC-SHS-VPC) board exceeds the Low cost SHS of Vinyl Polychloride (LC-SHS-PP).

Although it requires low investment, maintenance is cheap and does not waste water, the electric shower turned out to be: a) the system less energy efficient; b) the system that has the greatest ecological impact due to upstream greenhouse gas emissions and c) the most costly system over the life cycles of alternative technologies.

By that I_{EE} the economic ties were elucidated and the ecoefficiencies combined with the water and energy efficiency, connecting supply-demand as a macrosystem ecological of multiple inputs-outputs.

3.5 ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank CAPES for their financial support.

3.6 NOMENCLATURE

3.6.1 Abbreviations

ASHP	- Air-Source Heat Pump
CBA	- Cost-Benefit Analysis
CBI	- Cost Benefit Index
GRI	- Global Reporting Initiative
LC-SHS-PP	- Low Cost SHS of Polypropylene
LC-SHS-VPC	- Low Cost SHS of Vinyl Polychloride
SDR	- Social Discount Rate
SHPS	- Solar Heat Pump Systems
SHS	- Solar Heating System

3.6.2 Variables

$C_{or_{min}}$	- minimum annual operational cost, $r_{min} = 2$, US\$
C_{or}	- annual operational cost of r , US\$
C_c	- annual costs of carbon credits, US\$
B	- sum of the discounted benefits, US\$
$C_{t=0}$	- capital or initial value, US\$
C	- discounts of current cost, US\$
D_r	- amounts of annual costs of wastage of water and energy of the route r , US\$
i	- interest rate, US\$/t
I	- investment expenses (acquisition + installation + maintenance of the system), US\$
IEE	- Index of Economicity and Eco-efficiency (of a path any r)
k	- cycle of life of the route more durable ($\alpha = 20$);
M	- final amount, US\$
P_s	- profitability coefficient, US\$
rs	- Social Discount Rate (SDR), US\$/t
t	- total time, year
W	- cost of the system + energy expenditures + water expenditures (of r 1)/bath, US\$
α	- cycle of life of the technology/route r , year

3.6.3 Subscripts

c	- carbon credits, us\$
min	- minimum
n	- year
o	- opportunity cost, us\$
r	- route/technology

REFERENCES²⁶

- [1] - Hepbasli, A., Kalinci, Y., A review of heat pump water heating systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2009, Pp. 1211–1229,
- [2] - Chow, T.T., Fong, K.F., Pei, G., Ji, J., He, M., Potential use of photovoltaic-integrated solar heat pump system in Hong Kong, *Applied Thermal Engineering*, v. 30(8), 2010, pp.1066-1072,
- [3] - Luo, Q., Tang, G., Liu, Z., Wang J, A novel water heater integrating thermoelectric heat pump with separating thermosiphon, *Applied Thermal Engineering*, 2005,25:2193–203.
- [4] - Lu Aye, W., Charters, S., Chaichana, C., Solar Heat Pump Systems for Domestic Hot Water, *Solar Energy Vol*, 73, No, 3, 2002, pp. 169–175,
- [5] - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, (2009), Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio 1981/2009, Disponível em: <https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=PD206>, Acesso: 18 out, 2017,
- [6] - Achão, C., Schaefer, R., Energia e classes de renda no Brasil: um retrato do consumo no setor residencial, In: X Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ-SBPE-CE, 2004.
- [7] - Russi, M, et al., Estratégias construtivas na busca de conforto térmico e eficiência energética em edificações unifamiliares de interesse social nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 brasileiras, *Revista de Arquitetura da IMED*, v. 1, n.2, 2012, p. 113-121.
- [8] - Cassard, H., Denholm, P., Ong, Sean, (2011), Technical and economic performance of residential solar water heating in the United States, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, issue 8, October, pages 3789-3800.
- [9] - Ropke, I., The early history of modern ecological economics, *Ecological Economics*, v. 50, 2004, p. 293-314.
- [10] - Operador Nacional do Sistema Elétrico – NOS, Históricas da Operação - Geração de Energia, Disponível em http://www.ons.org.br/historico/geracao_energia.aspx, Consulted 14-04, 2017.
- [11] - Pereira, M., Dos Santos, C., Protótipo de um sistema de aquecimento de água para população de baixa renda usando energia solar e elétrica, com reaproveitamento de calor, *ForScience*, v. 3, n, 2, 2015, p. 56-72.
- [12] - De Jong, P., Forecasting, integration, and storage of renewable energy generation in the Northeast of Brazil, Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PEI), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.
- [13] - De Jong, P., Economic, technical and environmental analysis of renewable and non-renewable electricity generation technologies in Brazil, Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PEI), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

²⁶ Foi conservada a formatação da publicação de destino, fontes sem negrito ou itálico, numeradas entre colchetes.

- [14] - De Jong, P., Kiperstok, A., Torres, E., Economic and environmental analysis of electricity generation technologies in Brazil, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 52, 2015, p. 725-739.
- [15] - De Souza, L., Bezerra, J., Sistema Alternativo de Aquecimento Solar, Anais, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Brasil, Natal, RN, 2000.
- [16] - Boscoli, M., , Usuários de habitação de interesse social e adoção de sistema de aquecimento solar de água: estudo de caso em Londrina-PR, 2010, 110 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010,
- [17] - Stern, N., *The Economics of Climate Change*, The Stern Review, Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- [18] - Rockström, J, et al., Planetary Boundaries: Exploring the safe operating space for humanity, *Ecology and Society*, In Press 14th September, 2009.
- [19] - Rockström, J, et al., A safe operating space for humanity, *Nature*, vol 461 (24), September, 2009.
- [20] - Working Group On The 'Anthropocene (WGA), What is the 'Anthropocene?': current definition and status, Publicado em 2009, Disponible en: <http://quaternary.stratigraphy.org/workinggroups/anthropocene/>, Consulted 7-8, 2017.
- [21] - Cornell, S., Response to Rockström et al., (Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity): On the System Properties of the Planetary Boundaries, *Ecology and Society* 17(1): 2009, r2.
- [22] - Morris, S., Goldstein, G., Fthenakis, V., NEMS and MARKAL-MACRO Models for Energy-Environmental-Economic Analysis: A Comparison of the Electricity and Carbon Reduction Projections, *Environmental Modeling & Assessment*, September, Volume 7, Issue 3, 2002, pp. 207–216,
- [23] - Murphy, R., Jaccard, M., Energy efficiency and the cost of GHG abatement: A comparison of bottom-up and hybrid models for the US, *Energy policy*, v. 39, 2011, n, 11, p. 7146-7155.
- [24] - Rückert, F., O ambientalismo em três escalas de análise, *Cadernos IHU*, São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2015,
- [25] - Safonov, P., Comar, V., Ortega, E., Modelagem do Brasil: cenários para o desenvolvimento, UNICAMP. Disponible en: www.unicamp.br/fea/ortega/livro/c06-brasil-sco.pdf, Consulted 10-9, 2017,
- [26] - Sarica, K., Tyner, W., Economic impacts of increased US exports of natural gas: An energy system perspective, *Energies*, v. 9, n, 6, p. 401, 2016.
- [27] - Kalogirou, S., Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters, *Solar Energy*, v. 83, 2009, n, 1, p. 39-48.
- [28] - Sarica, K., Tyner, W., Alternative policy impacts on US GHG emissions and energy security: a hybrid modeling approach, *Energy Economics*, v. 40, 2013, p. 40-50.
- [29] - Ko, F, Et al., Long-term CO 2 emissions reduction target and scenarios of power sector in Taiwan, *Energy Policy*, v. 38, n, 1, 2010, p. 288-300.

- [30] - Wenyang, C., The costs of mitigating carbon emissions in China: findings from China Markal-Macro modeling, *Energy Policy*, v. 33(7), 2005, pp.885-896.
- [31] - Bahia, Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (Coelba), Tabela de Tarifa e Preço Final de Energia Elétrica, Resolução 2.222 de 22 de abril de 2017.
- [32] - Bahia, Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A, (Embasa), Tarifas, Disponível em: <http://www.embasa.ba.gov.br/centralservicos/index.php/tarifas>, Acesso em: 06 jul, 2017.
- [33] - Imperial, L., Pereira, O., Análise do potencial do recurso solar na Bahia a partir de software de informação geográfica baseado na web, V Congresso Brasileiro de Energia Solar (V CBENS), Anais, Recife/PE, 2014.
- [34] - Centro Incubador De Empresas Tecnológicas - Cietec., Manual de Instrução de Manufatura e Instalação Experimental do Aquecedor Solar de Baixo Custo, São Paulo: CIETEC, 2009,
- [35] - São Paulo, Universidade de São Paulo - USP. CIETEC Incubadora de Empresas Tecnológicas – São Paulo, Disponível em: <http://www5.usp.br/servicos/incubadora-de-empresas-tecnologicas-sao-paulo/>, Acesso: 06 ago, 2017,
- [36] - Kim, M., Kim, Ms., Chung, Jd., Transient thermal behavior of a water heater system driven by a heat pump. *International Journal of Refrigeration*, 2004, 27:415–21
- [37] - Laipradit, P., Tainsuwan, J., Kiatsiriroat, T., Aye, L., Theoretical performance analysis of heat pump water heaters using carbon dioxide as refrigerant, *International Journal of Energy Research*, 2008, 32:356–66,
- [38] - Zhang, J., Wang, Rz, Wu, Jy., System optimization and experimental research on air source heat pump water heater, *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27:1029–35.
- [39] - Siqueira, D., Estudo de desempenho do Aquecedor Solar de Baixo Custo, Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
- [40] - Jelly Fish, Energia Solar – Solar Banho, Disponível em: <http://jellyfish.com.br/produtos/produtos-energia-solar/produto-solar-banho/>. Consulted: 7 ago. 2017.
- [41] - Jelly Fish, Bombas de Calor – Hot 55/70 (Banho), Disponível em: <http://jellyfish.com.br/produtos/produtos-energia-solar/produto-solar-banho/>. Consulted: 7 ago. 2017.
- [42] - Soli clima, Heat Pump. Disponível em: http://www.soliclima.com/en/heat_pump.htm. Consulted: 7 ago. 2017.
- [43] - Soletrol, Aquecedor Solar, Disponível em <http://www.soletrol.com.br/produtos/> Consulted 7-8, 2017.
- [44] - Anderson Floor Warming And Renewables, Air source heat pumps, Disponível em <http://www.andersonfloorwarming.co.uk/heating/heat-pumps/air-source-heat-pumps/> Consulted 7-8, 2017.
- [45] - Nibe Energy Systems, Air Source Heat Pumps, Disponível em <http://www.nibe.co.uk/> Consulted 7-8, 2017.

- [46] - Dimplex, Detalhes técnicos: Bomba de calor, Disponível em <http://www.dimplex.de/es/profesional/detalles-tecnicos/bombas-de-calor/el-funcionamiento-de-una-bomba-de-calor.html> Consulted 7-8, 2017.
- [47] - Dimplex, La bomba de calor reversible, Disponível em <http://www.dimplex.de/animationen/kreislauf2.php?lang=es> Consulted 7-8, 2017
- [48] - Borges, T., Síntese Otimizada de Sistemas de Aquecimento Solar de Água, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009,
- [49] - Lima, J., Otimização de sistema de aquecimento solar de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa TRNSYS, Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- [50] - Miranda, M., Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [51] - Chiaretti, D., Preço do carbono tem de saltar para cumprir acordo do clima, diz estudo, Valor Econômico, Edición 29 mayo 2017, Disponível em <http://www.valor.com.br/internacional/4984338/preco-do-carbono-tem-de-saltar-para-cumprir-acordo-do-climadiz-estudo> Consulted 21-9, 2017,
- [52] - Sequestrar Carbono., O Mercado de Carbono no Mundo – Preço do CO₂ – Credito de Carbono, Disponível em <https://sequestrarcarbono.com/2017/03/22/o-mercado-de-carbono-no-mundo-preco-do-co2/>, Consulted 21-9, 2017,
- [53] - Cavalcanti, Clóvis., Concepções da economia ecológica: suas relações com a economia dominante e a economia ambiental, Estudos Avançados, 2010, 24 (68),
- [54] - Barbier, Edward B., Markandya, Anil, Pearce, David W., Environmental sustainability and cost-benefit analysis, Environment and Planning A, v. 22, n, 9, 1990, p. 1259-1266.
- [55] - Boardman, Anthony E., Greenberg, David H., Vining, Aidan R., Weimer David L, (2006), Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice, New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- [56] - Noe, Raymond A., Hollenbeck, John R., Gerhart, Barry, Wright, Patrick M, (2003), Human Resource Management: Gaining a Competitive Advantage, 9e, Nova York: Mc Graw Hill Education.
- [57] - Hanley, N., Spash, C., Cost Benefit Analysis and the Environment, *Environmental Values*, 1996, 5 (2):182-183,
- [58] - Abecassis, F., Cabral, N., Análise Económica e Financeira de Projetos, 4 ed, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2000.
- [59] - Mishan, E. J., Quah, E., Cost-Benefit Analysis, New York: Routledge Taylor & Francis Group. 2007.
- [60] - Tolmasquim, M., Farias, J, (Coord.), Índice de Custo Benefício (ICB) de Empreendimentos de Geração Termelétrica: Metodologia de Cálculo, Brasília: Ministério de Minas e Energia – MME, 2011.
- [61] - Garrido, R, Análise de Custos e Benefícios Sociais e Privados de Sistemas Centralizadores de Tratamento de Efluentes Industriais: O Caso do Polo Petroquímico de

Camaçari, Dissertação (Mestrado em Economia), Faculdade de Ciências Econômicas da Universidade Federal da Bahia - UFBA, Salvador, 1991.

- [62] - Contador, C, R, Avaliação Social de Projetos, 2.ed, São Paulo: Atlas, 1988,
- [63] - Araújo, Aneide Oliveira, Ramos, Maria da Conceição Pereira, Limitações dos relatórios de sustentabilidade para análises custo-benefício de ações sociais e ambientais, Contextus-Revista Contemporânea de Economia e Gestão, v. 13, n, 1, p. 132-155, 2015.
- [64] - Bovo, Cassiano Ricardo, A contribuição da teoria da rede social, de mark granovetter, para a compreensão do funcionamento dos mercados e a atuação das empresas, Pensamento & Realidade, v. 29, n, 3, 2015, p. 17,
- [65] - Romeiro, Ademar Ribeiro, Economia ou economia política da sustentabilidade, Economia do meio ambiente: teoria e prática, Rio de Janeiro: Editora Campus, 2003, p. 1-29.
- [66] - Prest, A, R., Turvey, R, Cost-Benefit Analysis: A Survey, *The Economic Journal*, v. 75, no, 300 (Dec, 1965), pp. 683-735.
- [67] - Ropke, Inge, The early history of modern ecological economics, *Ecological economics*, v. 50, n, 3, 2004, p. 293-314.
- [68] - Cechin, Andrei Domingues, Veiga, José Eli Da, A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen, *Revista de Economia Política*, v. 30, n, 3, p. 438-454, 2010
- [69] - Fuks, Maurício, Reflexões sobre o paradigma da economia ecológica para a gestão ambiental, *Estudos avançados*, v. 26, n, 74, 2012, p. 105-120.
- [70] - Parish, R, M, The Scope of Benefit-Cost Analysis, *Economic record*, v. 52, n, 3, 1976, p. 302-314.
- [71] - Van Den Bergh, Jeroen Cjm, Ferrer-I-Carbonell, Ada, Munda, Giuseppe, (2000), Alternative models of individual behaviour and implications for environmental policy, *Ecological Economics*, v. 32, n, 1, p. 43-61.
- [72] - Dasgupta, A, K, (1974), Cost-Benefit Analysis, In: *Economic Theory and the Developing Countries*, London: Palgrave.
- [73] - Dasgupta, A, K., Pearce, D, W, *Cost-Benefit Analysis: Theory and Practice*, London: Macmillan, 1972.
- [74] - Barbier, Edward B., Markandya, Anil, Pearce, David W, Environmental sustainability and cost-benefit analysis, *Environment and Planning A*, v. 22, n, 9, 1990, p. 1259-1266.
- [75] - Cassis, F., Cabral, N, *Análise Económica e Financeira de Projetos*, 4 ed, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2000.
- [76] - Costa, Ana Cristina, Rodrigues, João, O nexo comensurabilidade-mercadorização e as limitações da análise custo-benefício como guia para a acção dos poderes públicos, *Revista Crítica de Ciências Sociais* [Online], 83 | 2008, colocado online no dia 01 Outubro 2012, criado a 30 Setembro de 2016.
- [77] - Groot, Rudolf, Wilson, Matthew A., Boumans, Roelof M, J, A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services, *Ecological Economics* 41 (SPECIAL ISSUE: The Dynamics and Value of Ecosystem Services: Integrating Economic and Ecological Perspectives), 2002, pp. 393–408.

- [78] - Hanafizadeh, Payam, Latif, Vahideh, Robust net present value, *Mathematical and Computer Modelling*, v. 54, n, 1, 2011, p. 233-242.
- [79] - Remer, Donald S., Nieto, Armando P. Comparison of depreciation and corporate tax policies between the countries of the North American free trade area (NAFTA) and the European Community (EC), *International journal of production economics*, v. 32, n, 3, 1993, p. 335-354.
- [80] - Remer, Donald S., Nieto, Armando P. A compendium and comparison of 25 project evaluation techniques, Part 1: Net present value and rate of return methods, *International Journal of Production Economics*, v. 42, n, 1, 1995, p. 79-96.
- [81] - Remer, Donald S., Nieto, Armando P. A compendium and comparison of 25 project evaluation techniques, Part 2: Ratio, payback, and accounting methods, *International Journal of Production Economics*, Volume 42, Issue 2, December, 1995.
- [82] - Remer, Donald S., Stokdyk, Scott B., Van Driel, Mike, Survey of project evaluation techniques currently used in industry, *International Journal of Production Economics*, v. 32, n, 1, 1993, p. 103-115.
- [83] - Smith, V, Kerry, Moore, Eric M, *Behavioral Economics and Benefit Cost Analysis*, *Environ Resource Econ.*, 46:217–234, 2010.
- [84] - Souza, Roberta Fernanda da Paz de, *Economia do Meio Ambiente: Aspectos Teóricos da Economia Ambiental e da Economia Ecológica*, Anais, XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, Rio Branco, 2008,
- [85] - Stavins, Robert N, *Environmental Economics*, NBER Working Paper No, 13574, November, 2007.
- [86] - Wiesemann, Wolfram, Kuhn, Daniel, Rustem, Berç, Maximizing the net present value of a project under uncertainty, *European Journal of Operational Research*, v. 202, n, 2, 2010, p. 356-367.
- [87] - Zamboin, Maurício Eugenio, A avaliação como instrumento de gestão em projetos de responsabilidade social empresarial, *Responsabilidade social das empresas: a contribuição das universidades*, v. 5, 2002, p. 379.
- [88] - Primo, Rilton G. B.; Rodríguez, José G.; Silva, Marcelo S.; Kalid, Ricardo de A.; De Jong, Pieter, Consumo y Generación de Energía como Macrosistema Ecológico: rutas de calentamiento de agua para hogares tropicales, In. Herrera, C.; Rodríguez, J.; Moreno, A.; García, M. (Org.), *Modelos Matemáticos para el Estudio del Medio Ambiente, Salud y Desarrollo Humano*. 1.ed. Granada: Universidad de Granada, 2018.

4 AVALIAÇÃO ESTOCÁSTICA DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

Voltados ao desenvolvimento de metodologias, os três capítulos anteriores realizaram análises que adotaram variáveis determinísticas de entrada com valores estabelecidos na literatura, gerando *outputs* igualmente determinísticos. O presente estudo consiste em uma análise estocástica das variáveis de saídas, a partir das PDFs das grandezas de entrada de entrada e do modelo dos sistemas de aquecimento de água; para tanto, utilizamos as Simulações de Monte Carlo (SMC). Foram usadas distribuições gaussianas, uniformes e triangulares com uso do programa R e do software Oracle[®] Crystal Ball, versão 11.1.2.4.850, aditivo ao Excell[®].

O R foi escolhido por ser gratuito, aberto, programável e muito utilizado em estudos técnico-científicos que necessitam de uma abordagem estatística. Os programas em R desenvolvidos estão no Apêndice A e, caso alguém deseje fazer melhorias ou acréscimos nos mesmos, encorajamos que nos envie as novas versões, de modo mantermos esse repositório atualizado.

O Oracle[®] Crystal Ball oferece uma opção *trial* (gratuita por tempo determinado) e tem sido usado em estudos que exigem modelagem de previsões, simulações e otimizações, embora sua velocidade de cômputo seja muito menor que a do R, seja por suas opções de relatório automatizadas, ferramentas para comparar e otimizar cenários alternativos, gráficos com várias exibições e definições de personalização para aprimorar a apresentação dos dados, seja por oferecerem estas e outras opções sem exigir do tomador de decisões (e/ou do analista não especializado em estatística) o aprendizado de linguagens de programação para realizar as SMC na avaliação de incertezas (CAMARGO DE ABREU; AMORIM, 2017; SILVA, 2017). A planilha com a programação das SMC com uso do Oracle[®] Crystal Ball está no Apêndice B.

A escolha do tipo de PDF, se uniforme, triangular ou gaussiana, foi conforme o conteúdo informacional conhecido segundo o Princípio da Entropia Máxima (GUIASU; SHENITZER, 1985; SINGH, 2003; PENFIELD JR, 2010; KERN-ISBERNER; WILHELM; BEIERLE, 2017), a saber: se apenas conhecida faixa de variação, utilizaram-se as PDF uniformes; se é conhecido o valor mais provável e o mínimo e máximo, as PDF triangulares foram usadas, com a moda sendo o valor médio dos extremos; se é conhecida a média e variância, PDF gaussianas.

Em particular, na definição do perfil de uso de água por uma família brasileira partiu-se da análise empírica de L. Souza e J. Bezerra (2000) na qual a família considerada estava composta

de quatro pessoas que tomam três banhos por dia, de seis minutos cada, com chuveiro padrão e registro meio-aberto (5 L/minuto), totalizando $\cong 11 \text{ m}^3/\text{mês}$. Este perfil merece tratamento probabilístico, dado que variam o número de membros das famílias e os hábitos de uso da água, concedendo maior generalidade às inferências das análises, com emprego do método elaborado.

E.g., a tendência do casal com dois filhos (ou com filho e agregado ou parente) já não domina: dados do último Censo Demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no Brasil cerca de 16,8 milhões (mi) de famílias residentes em domicílios particulares são de até duas pessoas e 16,5 mi de até três pessoas; com até quatro membros são já a minoria: 12,4 mi. No Nordeste, diferentemente, o número de famílias com até três membros (4,3 mi) é maior que o com dois (4,1 mi), mas é também minoria o grupo das famílias com quatro membros (3,3 mi); a Bahia alinha-se a este padrão: família de 3 membros é a moda e de 4 minoria (BRASIL, 2010). O tratamento estocástico aqui dado a esta variável de entrada (*input*), por suas características de distribuição, é uma PDF triangular, com limites mínimo e máximo de 2 a 4 pessoas/família. Analogamente, aos demais *inputs* foram dados os tratamentos estatísticos cabíveis (Quad. 3.2).

Embora haja outros autores que empreguem uma média de banho/dia/pessoa no Brasil em torno de 3, como a equipe de Engenharia de Produção da FAEX, que assinalou ser o país um dos que maior número de banhos toma por semana, seguido pela Rússia e Japão (FRANCESCHI, 2015), não é incomum que, devido às variações de humidade do ar etc., este número caia para 2 ou 1. Outro aspecto a considerar, Tabela 4.1, é o intervalo de variação da grandeza “Comprimento equivalente da tubulação a montante”, que ora passa a atender esta ampla faixa de distância entre o reservatório térmico e o chuveiro: de um pavimento apenas, ao prédio de 12 andares. Assim, o plano metodológico inicial voltado a conjuntos verticais estende-se até os horizontais.

Além das grandezas de entradas e suas PDFs apresentadas no Tabela 4.1, as Simulações de Monte Carlo dependem do modelo, conforme apresentado nos capítulos anteriores; e de parâmetros assumidos constantes, adiante especificados, com as justificativas de método correspondentes. A quantidade de SMC das distribuições com R e Oracle foi de $1e+6$. Realizou-se SMCs com $1e+5$, $1e+4$ simulações, mas os resultados foram os mesmos, considerando três algoritmos significativos apropriados às grandezas de saída citadas às pág. 137-138 adiante. A probabilidade de abrangência, em ambos os casos, foi estabelecida igual a 90 %, pois os dados de entrada têm uma variabilidade elevada (SILVERMAN, 2018; HJORTH, 2017).

Quadro 4.1 - PDFs das grandezas de entrada*

Grandeza de Entrada	Mínimo	Máximo	Estimativa	Incerteza Padrão	Unidade	PDF
Vida útil	ChE: 3 SAS-C: 18 (ASBC-PVC, ASBC-PP, SHPS e ASHP): 10-2	ChE: 5 SAS-C: 20+2 (ASBC-PVC, ASBC-PP, SHPS e ASHP): 10+2	ChE: 5+1 SAS-C: 20+2 (ASBC-PVC, ASBC-PP, SHPS e ASHP): 10+2	n.a.	Anos	Triangular
Custo de aquisição	n.a.	n.a.	ChE: 70 SAS-C: 5 139 ASBC-PVC: 450 ASBC-PP: 450 SHPS: 3 648.69 ASHP: 2 877.84	ChE: 7 SAS-C: 513.9 ASBC-PVC: 45 ASBC-PP: 45 SHPS: 364.86 ASHP: 287.78	R\$	Gaussiana
Custo de instalação	n.a.	n.a.	ChE: 30 SAS-C: 400 ASBC-PVC: 350 ASBC-PP: 350 SHPS: 359.12 ASHP: 287.78	ChE: 5 SAS-C: 40 ASBC-PVC: 35 ASBC-PP: 35 SHPS: 35.91 ASHP: 28.77	R\$	Gaussiana
Custo de manutenção	n.a.	n.a.	ChE: 800 SAS-C: 101.88 ASBC-PVC: 200 ASBC-PP: 200 SHPS: 1 080.00 ASHP: 1 080.00	ChE: 80 SAS-C: 10.18 ASBC-PVC: 20 ASBC-PP: 20 SHPS: 108.00 ASHP: 108.00	R\$	Gaussiana
Quantidade de pessoas por domicílio	2	4	n.a.	n.a.	Pessoas	Triangular
Quantidade de banhos por dia	1	3	n.a.	n.a.	Banhos/dia	Triangular
Comprimento equivalente da tubulação a montante	2	18	n.a.	n.a.	m	Uniforme
Consumo mensal de energia com base num chuveiro elétrico de 3,5 kW	SAS-C: 7.79-0.78 ASBC-PVC: 8.42-0.82 ASBC-PP: 8.91-0.89 SHPS: 44.12-4.41 ASHP: 69.33-6.93	SAS-C: 7.79+0.78 ASBC-PVC: 8.42+0.82 ASBC-PP: 8.91+0.89 SHPS: 44.12+4.41 ASHP: 69.33+6.93	n.a.	n.a.	kW.h	Triangular
Consumo mensal de água útil	n.a.	n.a.	(ChE, SAS-C, ASBC-PVC, ASBC-PP, SHPS e ASHP) = 10.8	(ChE, SAS-C, ASBC-PVC, ASBC-PP, SHPS e ASHP) = 1.08	m ³	Gaussiana

Fonte: Elaboração do autor.

* n.a.: não se aplica. As estimativas e as incertezas-padrão das grandezas com distribuição não-gaussiana estão indicadas nos valores máximos e mínimos de suas distribuições. Para PDFs triangulares, a moda é dada pela média dos extremos.

O efeito estufa (GEE) foi tratado aqui como um parâmetro, embora obviamente varie no curso das transformações tecnológicas no bojo do sistema de geração e distribuição de energia (Tab. 4.2). Este tratamento para o GEE se explica por já ter sido ele objeto de atenções metodológicas de convergência de estimativas face às variações das mesmas na literatura (MIRANDA, 2012), através de um processo considerado meta-analítico, por atingir uma síntese dos resultados disponíveis considerando a compatibilidade ou não de seus métodos e hipóteses, gerando taxas únicas de *outputs* de cada opção de geração de energia da matriz local que, neste caso, é a Bahia.

Tabela 4.2 - Efeito estufa dos sistemas na matriz energética da Bahia*

Sistema de Aquecimento	Estimativa do Efeito estufa / (t·(kW·h) ⁻¹)
1 ChE	7,0424424000
2 SAS-C	0,2698819001
3a SAS-PVC	0,2916558114
3b SAS-PP	0,3086963756
4a SHPS	2,4648548400
4b ASHP	3,8733433200

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Miranda (2012).

* Em toneladas de CO₂ equivalente.

Preços variável e fixo da água (tabela da Embasa), de CO₂ (BIRD) e energia (Coelba) foram tratados também como parâmetros, em uma análise estático-comparativa, mas igualmente nenhum o sendo de fato constante. Igualmente, para o cálculo do custo de oportunidade, os menores custos hídricos e energéticos foram ancorados, bem como, para o cálculo do Índice de Economicidade e Ecoeficiência, os maiores custos totais, com e sem GEE.

Um ajuste adicional nas variáveis de entrada, em relação aos citados estudos anteriores, foi a consideração do descarte da água fria retida no tambor do chuveiro, até que se aqueça, estimada empiricamente em cerca de 1,0 L por banho, volume convertido 3,5 m de tubulação equivalente.

As grandezas de saída (*outputs*) elencadas abaixo têm cenários com e sem desperdícios (no caso dos SAS e ASBC) e cenários com e sem GEE a todos os seis sistemas, no maior CV (20 anos):

- ❖ Custo total
- ❖ Economia Total
- ❖ Custo por Banho
- ❖ Índice de Economicidade e Ecoeficiência

As grandezas intermediárias imprescindíveis à estatística dos *outputs* estão elencadas a seguir

- ❖ Reinvestimento
- ❖ Volume de água desperdiçado mensal
- ❖ Volume total de água
- ❖ Custo mensal total da água
- ❖ Custo do Efeito Estufa
- ❖ Custo por banho

- ❖ Quantidade de banhos acumulada em 20 anos
- ❖ Custo da água acumulado em 20 anos
- ❖ Custo da energia acumulado em 20 anos
- ❖ Custo de oportunidade da água acumulado em 20 anos
- ❖ Custo de oportunidade da energia acumulado em 20 anos
- ❖ Custo total da água acumulado em 20 anos
- ❖ Custo total da energia acumulado em 20 anos
- ❖ Economia total
- ❖ Índice de Economicidade e Ecoeficiência

Nas Figuras 15 a 17 são apresentados de 3 histogramas, como extrato das grandezas de entrada, com PDFs uniforme, triangular e gaussiana. No link I do Apêndice A estão disponibilizados todos os histogramas em R das grandezas de entrada dos 6 sistemas de aquecimento analisados.

Complementariamente, pode-se observar, das Figuras 18 a 23, histogramas das grandezas de saída EEI e Custo do banho para todos os sistemas de aquecimento, obtidos a partir da SMS; também no link II do Apêndice A estão disponibilizados os histogramas das grandezas de saída para os 6 sistemas de aquecimento.

O relatório completo com as distribuições dos 46 pressupostos (ou variáveis de entrada) e 72 previsões definidas (ou variáveis de saída), pode ser acessado pela quarta aba da planilha disponível no link do Apêndice B. Neste relatório estão representadas, em cada uma das 118 distribuições, suas média, mediana, moda, desvio-padrão, curtose, coeficiente de variação, mínimo, máximo, a largura do intervalo e o erro padrão médio.

No intervalo da apresentação de cada grupo de histogramas serão feitas algumas considerações sobre o novo alcance das simulações não-determinísticas face às anteriores e novas inferências.

Os resultados são elaborações originais do autor: a “fonte” não será indicada por evitar repetições

Particularmente esta distribuição para o ASBC de PVC (Figura 17) amplia o espectro de edificações, conforme anunciado, tornando a análise, que era centrada em conjuntos verticais, em uma abordagem que considera distâncias entre o reservatório térmico e a saída de água útil de 2 a 18 metros. Como é natural, abordagens específicas de conjuntos verticais de determinado padrão de altura, ou horizontais, devem dar um tratamento singular a esta grandeza.

O tratamento estocástico para o número de pessoas por domicílio também ampliou o raio de impacto das inferências, além de torná-las mais aderentes aos dados empíricos do Censo Demográfico, conforme anteriormente discutido. Tratamentos análogos foram dados a variáveis como o número de banhos, que passou a distribuir-se, triangularmente, de 1 a 3, com moda em 2. O maior realismo e aplicabilidade justificam as simulações.

Nas Figura 18 a Figura 23 observa-se que o custo final do banho para cada sistema, no cenário 2, que presume a adoção das medidas de mitigação dos desperdícios de água, mas considera em sua inteireza os impactos a montante das emissões de CO₂ equivalente ao longo da matriz energética, é probabilístico.

É possível comparar as grandezas de saída calculadas de forma determinística (Tabela 3.1 do Capítulo 03) e estocástica (Tabela 4.1), que expressam estes custos unitários e totais acumulados, e suas respectivas incertezas-padrão. As incertezas-padrão apesar de elevadas são representativas, pois foram obtidas por método que trata adequadamente sistemas com alta incerteza – Simulação de Monte Carlo, método que utiliza o modelo não linear do sistema em análise.

Na Tabela 4.2 é apresentada a diferença entre esses resultados, mostrando que, nos cenários estudados, os resultados da simulação estocástica apresentaram custos iguais ou menores aos cálculos com variáveis determinísticas. Esse comportamento é coerente, pois as grandezas de entrada para as SMCs tiveram como limite superior seus valores determinísticos.

As PDFs das grandezas de saída (custos e EEIs) podem ser considerado que, aproximadamente, seguem distribuições gaussianas, Figura 17 à Figura 23. Em trabalhos futuros serão identificadas as PDFs que são mais aderentes a cada grandeza de saída e suas respectivas incertezas expandidas.

A Tabela 4.3 apresenta custos acumulados e unitários e respectivos intervalos de abrangência. Foi considerado que as PDFs dessas grandezas são aproximadamente gaussianas e uma probabilidade de abrangência de 95,45 %, um valor conservador, dessa forma obteve-se um fator de abrangência igual a 2. Comparando os intervalos de abrangências dessas rotas observa-se que:

- a) O custo total da rota '1 Resistência' é estatisticamente distinto dos demais;
- b) O custo total da rota '2 SAS convencional' é estatisticamente distinto dos demais;
- c) O custo total das rotas '3 a-ASBC de PVC' e '3 b-ASBC de PP' se sobrepõem, portanto, essas alternativas são estatisticamente equivalentes, contudo esses são estatisticamente distintos dos demais;
- d) O custo total da rota '4 a-SHPS' é estatisticamente distinto dos demais;
- e) O custo total da rota '4 b-ASHP' é estatisticamente distinto dos demais.

Portanto, as rotas 3 a e 3 b são as que apresentaram menores custos, contudo essas são tecnologicamente mais complexas, por não serem industrializadas, mas manufaturadas, que a rota 2, a que teve o menor custo após as rotas 3. Logo, se a manutenção simples ou padronizada industrialmente for um requisito importante, para os *stakeholders*, a rota mais apropriada é a 2.

Figura 15 - Distribuição triangular para a variável de entrada quantidade de pessoas

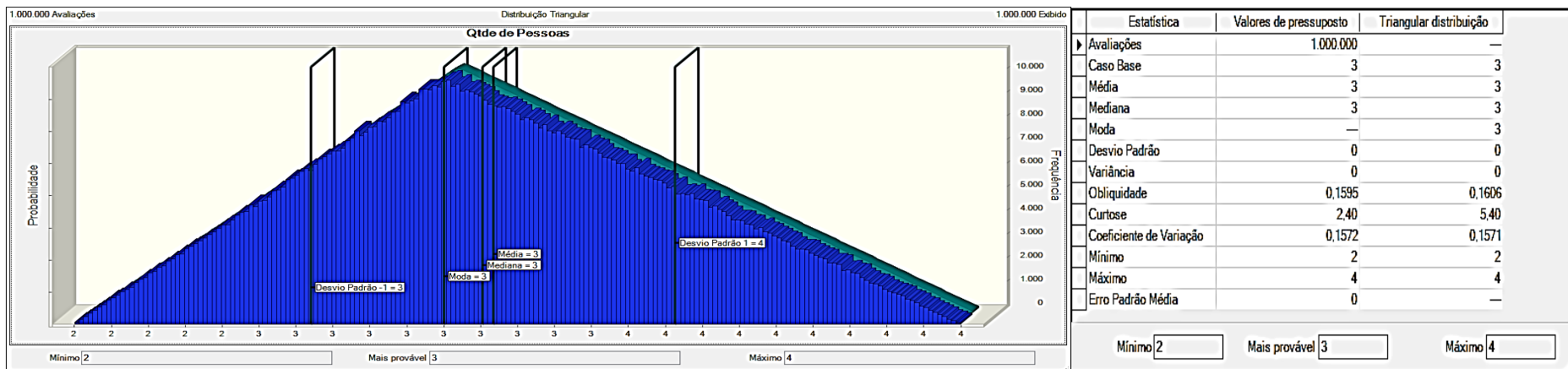


Figura 16 - Distribuição normal da variável de entrada custo de manutenção do ASHP

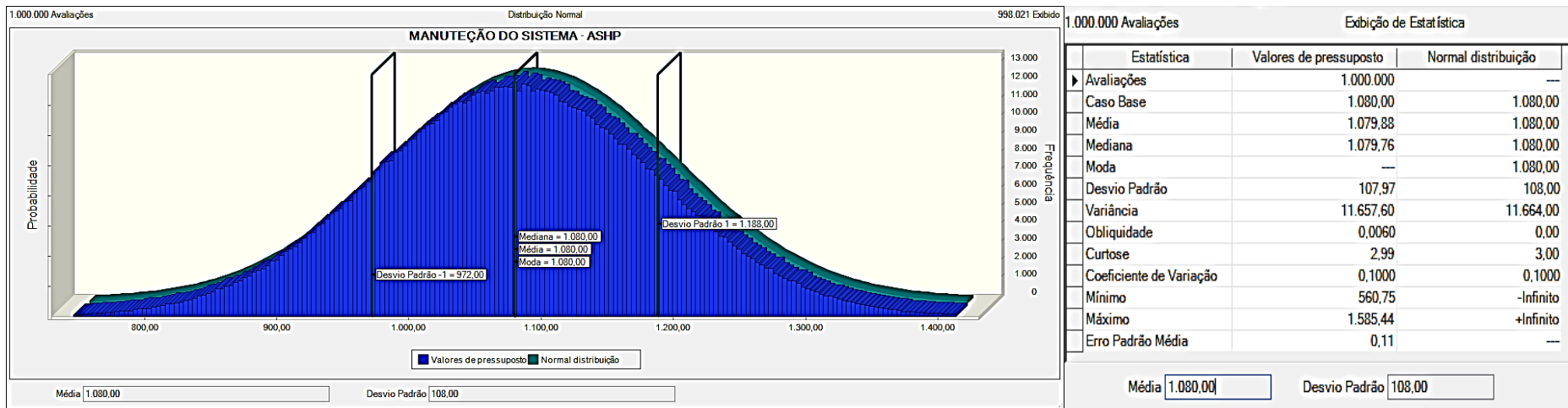


Figura 17 - Distribuição uniforme da variável de entrada comprimento da tubulação para o ASBC de PVC

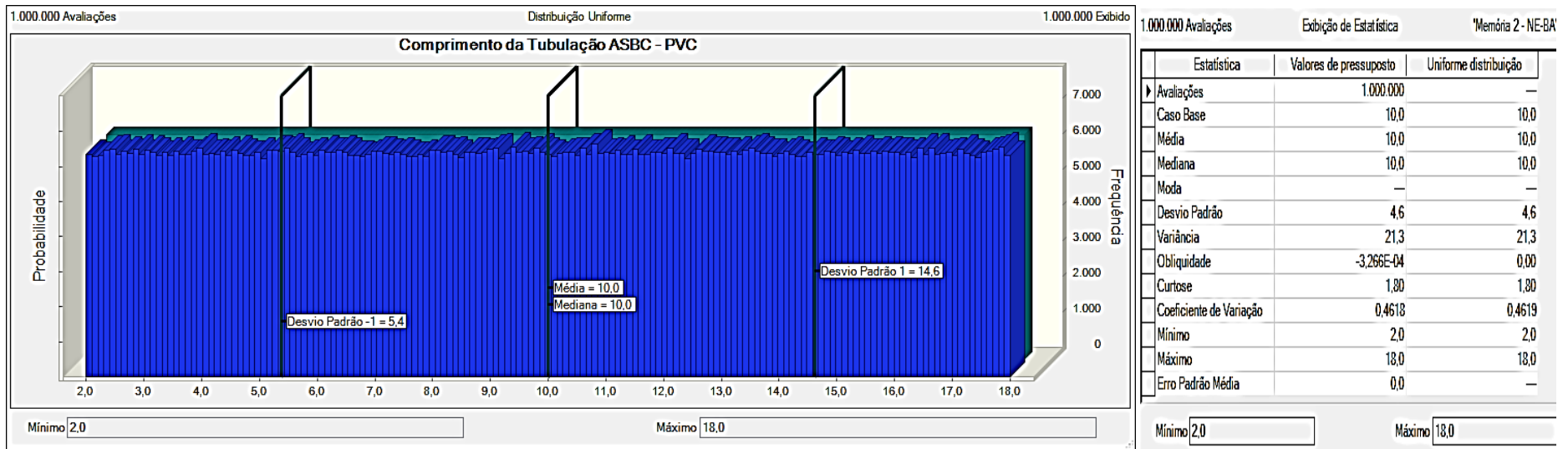


Figura 18 - Distribuição do custo do banho do chuveiro elétrico no cenário 2 considerando o efeito estufa a montante

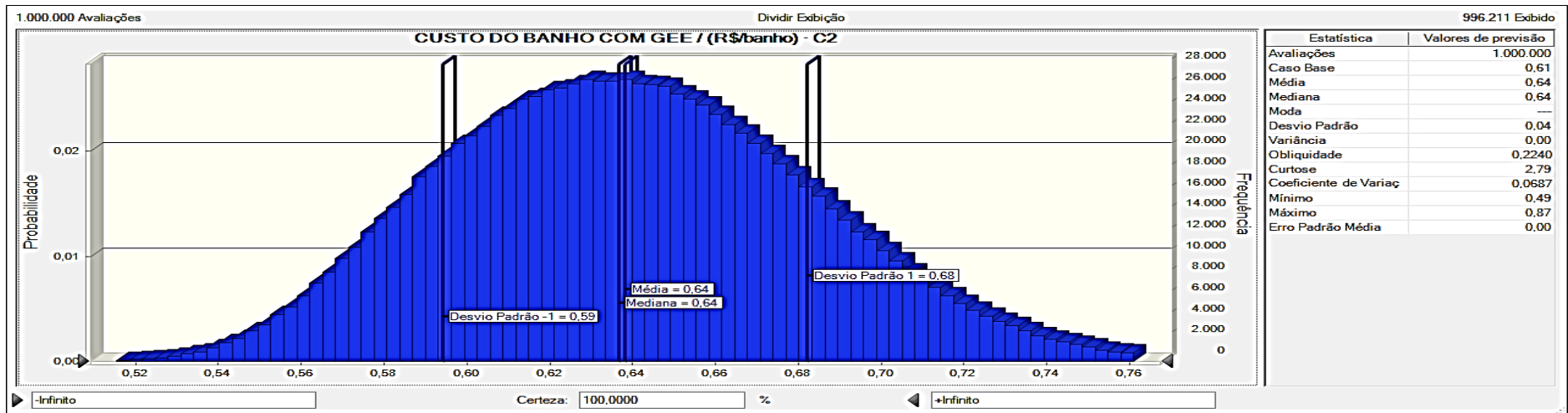


Figura 19 - Distribuição do custo do banho do SAS Convencional no cenário 2 (sem desperdícios) considerando o efeito estufa a montante

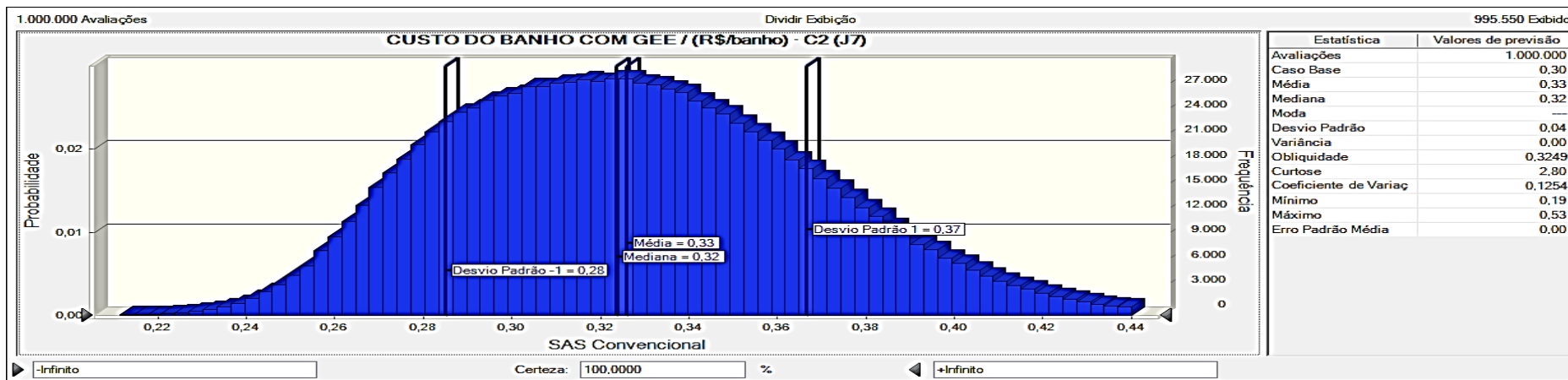


Figura 20 - Distribuição do custo do banho do ASBC de PVC no cenário 2 (sem desperdícios) considerando o efeito estufa a montante

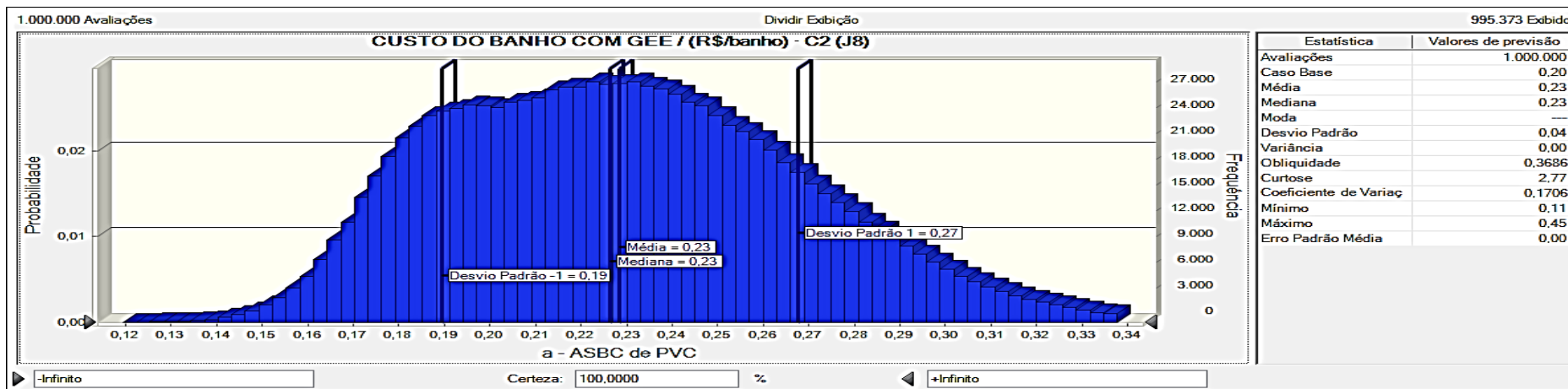


Figura 21 - Distribuição do custo do banho do ASBC de PP no cenário 2 (sem desperdícios) considerando o efeito estufa a montante

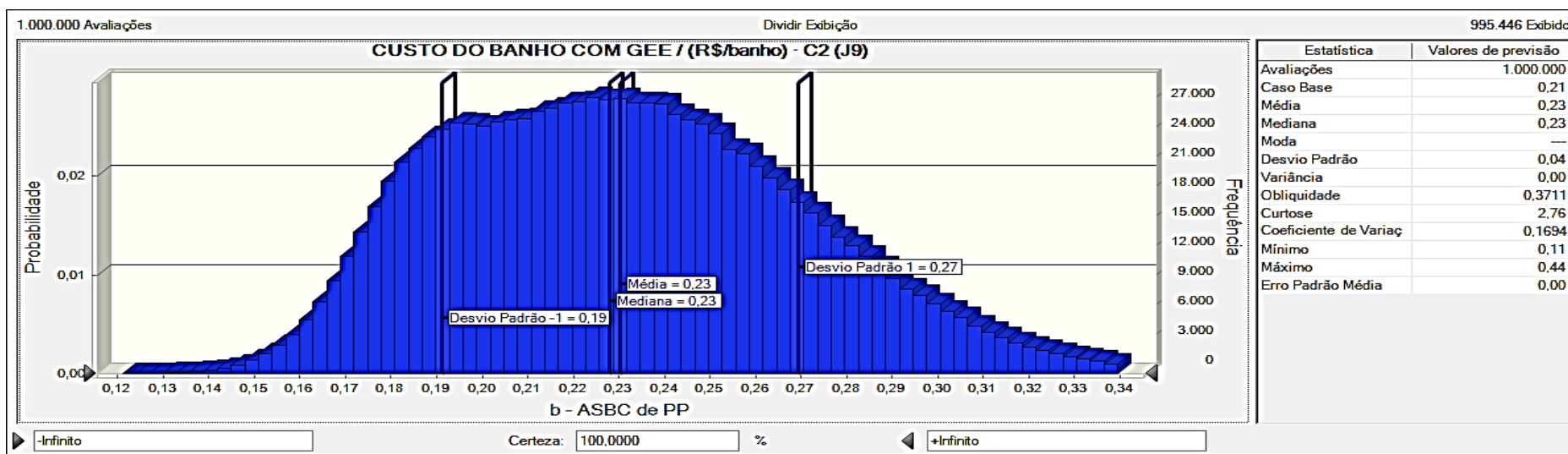


Figura 22 - Distribuição do custo do banho da SHPS no cenário 2 (sem desperdícios) considerando o efeito estufa a montante

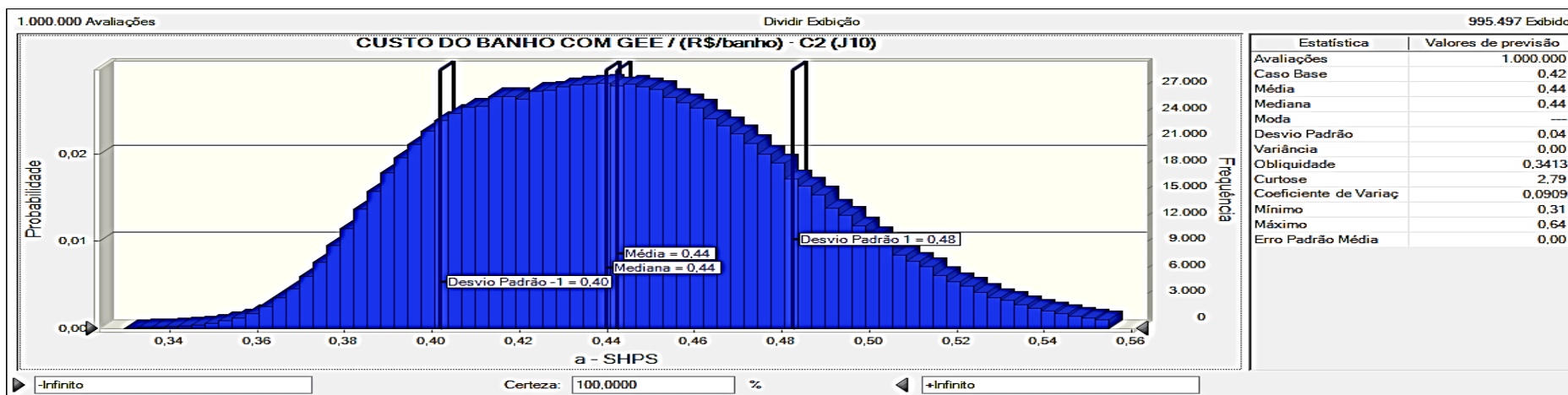


Figura 23 - Distribuição do custo do banho do ASHP no cenário 2 (sem desperdícios) considerando o efeito estufa a montante

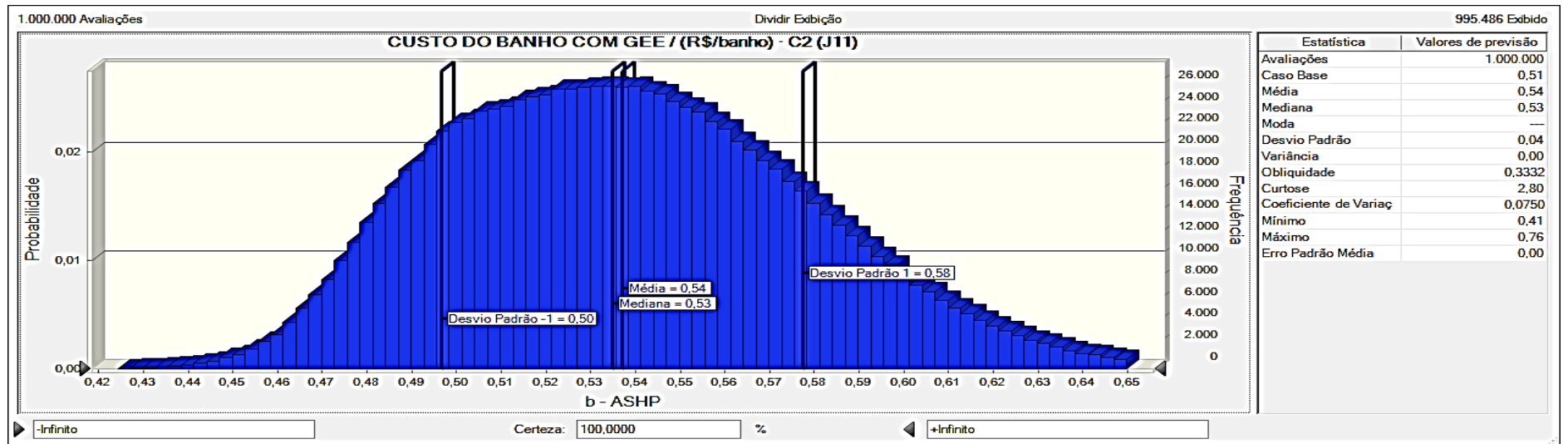


Tabela 4.1 - Custos estocásticos acumulados e unitários do banho e suas respectivas incertezas-padrão*

ROTAS (m)	Sistema de Aquecimento	CUSTO TOTAL SEM GEE / (R\$ x 10 ³)		CUSTO TOTAL COM GEE / (R\$ x 10 ³)		CUSTO DO BANHO SEM GEE / (R\$/banho)		CUSTO DO BANHO COM GEE / (R\$/banho)	
		C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
1	Resistência	51,8(4)	51,8(4)	53,7(4)	53,0(4)	0,60(0,04)	0,60(0,04)	0,61(0,04)	0,61(0,04)
2	SAS Convencional	27,7(4)	25,9(4)	27,8(4)	26,0(4)	0,32(0,04)	0,30(0,04)	0,32(0,04)	0,30(0,04)
3	a - ASBC de PVC	19,1(3)	17,5(3)	19,2(3)	17,6(3)	0,22(0,04)	0,20(0,04)	0,22(0,04)	0,20(0,04)
	b - ASBC de PP	19,5(3)	17,6(3)	19,5(3)	17,7(3)	0,23(0,04)	0,20(0,04)	0,23(0,04)	0,21(0,04)
4	a - SHPS	35,6(3)	35,6(3)	36,0(3)	36,0(3)	0,41(0,04)	0,41(0,04)	0,42(0,04)	0,42(0,04)
	b - ASHP	43,6(3)	43,6(3)	44,2(3)	44,2(3)	0,50(0,04)	0,50(0,04)	0,51(0,04)	0,51(0,04)

* Os valores entre parênteses são as incertezas-padrão das grandezas.

Tabela 4.2 - Diferença entre as estimações estocásticas (Tabela 4.1) e as determinísticas (Tabela 3.1 do Capítulo 03)

ROTAS (m)	Sistema de Aquecimento	CUSTO TOTAL SEM GEE / (R\$ x 10 ³)		CUSTO TOTAL COM GEE / (R\$ x 10 ³)		CUSTO DO BANHO SEM GEE / (R\$/banho)		CUSTO DO BANHO COM GEE / (R\$/banho)	
		C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
1	Resistência	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
2	SAS Convencional	-4,1	0,0	-4,1	0,0	-0,05	0,00	-0,05	0,00
3	a - ASBC de PVC	-4,3	0,0	-4,3	0,0	-0,05	0,00	-0,05	0,00
	b - ASBC de PP	-4,1	0,0	-4,1	0,0	-0,04	0,00	-0,04	0,00
4	a - SHPS	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-0,04	-0,04	-0,03	-0,03
	b - ASHP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 4.3 - Custos estocásticos acumulados e unitários do banho e seus respectivos intervalos de abrangência

ROTAS	Sistema de Aquecimento	CUSTO TOTAL SEM GEE / (R\$ x 10 ³)				CUSTO TOTAL COM GEE / (R\$ x 10 ³)			
		C1-Uc1	C1+Uc1	C2-Uc2	C2+Uc2	C1-Uc1	C1+Uc1	C2-Uc2	C2+Uc2
1	Resistência	51,0	52,6	51,0	52,6	52,3	53,9	52,2	53,8
2	SAS Convencional	26,9	28,5	25,1	26,7	27,0	28,6	25,2	26,8
3	a - ASBC de PVC	18,5	19,7	16,9	18,1	18,6	19,8	17,0	18,2
3	b - ASBC de PP	18,9	20,1	17,0	18,2	18,9	20,1	17,1	18,3
4	a - SHPS	35,0	36,2	35,0	36,2	35,4	36,6	35,4	36,6
4	b - ASHP	43,0	44,2	43,0	44,2	43,6	44,8	43,6	44,8

Na Tabela 4.4 são apresentados os Índices de Economicidade e Ecoeficiência das seis rotas tecnológicas em cenários com e sem GEE e com e sem desperdício hídrico, calculados por método estocástico (SMC) e suas incertezas-padrão. Observa-se que, em todos os casos estudados, as EEIs foram superiores a zero em relação ao aquecimento com resistência elétrica.

Tabela 4.4 - Estimções do Índice de Economicidade e Ecoeficiência (EEI) com 1e+6 Simulações de Monte Carlo*

Sistema de Aquecimento	EEI			
	C1 SEM GEE	C2 SEM GEE	C1 COM GEE	C2 COM GEE
Resistência	Referência para cálculo do EEI			
SAS Convencional	+ 47(8)%	+ 50(8)%	+ 48(8)%	+ 51(7)%
a - ASBC de PVC	+ 63(7)%	+ 66(7)%	+ 64(7)%	+ 67(7)%
b - ASBC de PP	+ 62(7)%	+ 66(7)%	+ 63(7)%	+ 67(7)%
a - SHPS	+ 31(8)%	+ 31(8)%	+ 32(8)%	+ 32(8)%
b - ASHP	+ 16(9)%	+ 16(9)%	+ 17(9)%	+ 17(9)%

* O EEI é calculado tendo como referência o chuveiro com resistência elétrica, por ser o de menor economicidade-ecoefficiência, definida na equação 03 do capítulo 3. Os valores entre parênteses, à direita das grandezas, são as incertezas-padrão.

A Tabela 4.5 apresenta os Índices de Economia e Ecoeficiência (EEI), e os respectivos intervalos de abrangência. Foi considerado que as PDFs dessas grandezas são aproximadamente gaussianas e uma probabilidade de abrangência de 95,45 %, um valor conservador; dessa forma, obteve-se um fator de abrangência igual a 2. Nos intervalos de abrangência da EEI das rotas ‘1 Resistência’ e ‘4 b-ASHP’ o limite inferior é zero (0) e considerou-se que o teste foi unicaudal. Comparando os intervalos de abrangências dessas rotas observa-se que:

- a) O EEI da rota ‘1 Resistência’ é estatisticamente distinto dos demais;
- b) Os EEIs das rotas ‘2 SAS convencional’, ‘3 a-ASBC de PVC’ e ‘3 b-ASBC de PP’ se sobrepõem; portanto, essas alternativas são estatisticamente equivalentes;
- c) Os EEIs das rotas ‘2 SAS convencional’, ‘4 a-SHPS’ e ‘4 b-ASHP’ se sobrepõem; portanto, essas alternativas são estatisticamente equivalentes;
- d) Os EEIs das rotas ‘4 a-SHPS’ e ‘4 b-ASHP’ se sobrepõem; portanto, essas alternativas são estatisticamente equivalentes.

Portanto, as rotas 3 a e 3 b são as que apresentaram maiores ecoeficiências estatisticamente superiores às demais rotas, embora essas rotas tenham estatisticamente desempenho equivalente à rota 2.

Tabela 4.5 – Intervalos de abrangência dos EEI

Sistema de Aquecimento	EEI / %							
	C1 SEM GEE		C2 SEM GEE		C1 COM GEE		C2 COM GEE	
	C1-Uc1	C1+Uc1	C2-Uc2	C2+Uc2	C1-Uc1	C1+Uc1	C2-Uc2	C2+Uc2
1 Resistência	0	10	0	10	0	10	0	10
2 SAS Convencional	31	63	34	66	32	64	37	65
3 a - ASBC de PVC	49	77	52	80	50	78	53	81
3 b - ASBC de PP	48	76	52	80	49	77	53	81
4 a - SHPS	15	47	15	47	16	48	16	48
4 b - ASHP	0	34	0	34	0	35	0	35

4.1 SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA

Como sugestões de desenvolvimento da pesquisa, face às incertezas e limites críticos atingidos pelas análises precedentes, seis linhas apresentam mais indícios de gerarem contribuições úteis:

1. Análise comparativa das curvas de custos acumulados dos sistemas, apontando médias, pontos de interseção com as de custos marginais, nivelamento destas com as de economias totais, sinalizando limites, inflexões e refinando os critérios decisórios;
2. Qualificação laboratorial das grandezas das variáveis de entrada (propagadas às de saída) para a Análise do Ciclo de Vida (ACV) dos sistemas, seleção das categorias de impacto mais relevantes, aplicação de testes de discernimento, em sucessivas rodadas, conforme a metodologia do Cone Invertido desenvolvida pelo TECLIM-UFBA (MEDEIROS; KIPERSTOK; PESSOA; SILVEIRA, 2018).

4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentada uma metodologia estocástica para avaliação econômica e da ecoeficiências de 6 sistemas de aquecimento de água, na qual é possível alterar as PDFs das grandezas de entrada (Quadro 4.2) ou parâmetros (Apêndices A e B) e assim adaptar a simulação a outros cenários.

Dentre as simulações realizadas, considerando os valores com maior probabilidade de ocorrência, os sistemas de aquecimento de água ASCB-PVC e ASCB-PP são os que apresentaram melhor desempenho, nos cenários 1, com ou sem consideração dos custos das emissões de CO₂ equivalente, todavia os intervalos de abrangência sinalizam para essas duas rotas são estatisticamente equivalentes; portanto outros critérios que consideram o contexto são necessários para a escolha do melhor sistema entre esses dois.

A rota do sistema de aquecimento convencional também é promissora, devido a sua simplicidade e ecoeficiência equivalente aos sistemas ASCB, embora o custo total seja, estatisticamente, maior que os do ASCB.

Duas potenciais linhas de desenvolvimento da pesquisa foram enunciadas, desde o tratamento mais detalhado dos custos à revisão metrológica das incertezas das grandezas de *input* e *output*.

Sugerimos que pessoas acrescentem novos cenários às simulações e as enviem ao email do autor (rilton@ufba.br), possibilitando ampliar as situações analisadas e identificar, nos novos cenários, o(s) sistema(s) mais ecoeficiente(s) conforme o EEI. Os Apêndices A e B dão os *links*.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Censo Demográfico**. Brasília: IBGE, 2010.
- CAMARGO DE ABREU, P.; AMORIM, F. Gerenciamento dos riscos em projetos de software. **Revista Interface Tecnológica**, v. 14, n. 1, p. 19, 29 jul. 2017.
- FRANCESCHI, Marcello Teixeira et al. O chuveiro inteligente. **Revista Científica e-Locução**, v. 1, n. 3, 2015.
- GUIASU, Silviu; SHENITZER, Abe. The principle of maximum entropy. **The mathematical intelligencer**, v. 7, n. 1, p. 42-48, 1985.
- HJORTH, JS Urban. **Computer intensive statistical methods: Validation, model selection, and bootstrap**. New York: Routledge, 2017.
- KERN-ISBERNER, Gabriele; WILHELM, Marco; BEIERLE, Christoph. Probabilistic knowledge representation using the principle of maximum entropy and Gröbner basis theory. **Annals of Mathematics and Artificial Intelligence**, v. 79, n. 1-3, p. 163-179, 2017.
- MEDEIROS, Diego Lima; KIPERSTOK, Asher; PESSOA, Robson Wilson Silva; SILVEIRA, Lindolfo Braga. Melhoria contínua da informação e apoio a tomada de decisão com o método cone-invertido. **Anais**, VI Congresso Brasileiro Sobre Gestão do Ciclo de Vida | GCV2018. Organização: IBICT e ABCV, Cooperação: UFSCar. Brasília, junho de 2018.
- PENFIELD JR, Paul. Principle of maximum entropy. **Information, Entropy and Computation**, p. 104-12, 2010.
- SILVA, Maria Beatriz Araújo et al. Vigilância entomologica dos vetores da Doença de Chagas no agreste pernambucano. **Revista Saúde e Desenvolvimento**, v. 11, n. 7, p. 229-244, 2017.
- SILVERMAN, Bernard W. **Density estimation for statistics and data analysis**. New York: Routledge, 2018.
- SINGH, Vijay P. Principle of Maximum Entropy. **Entropy Theory and its Application in Environmental and Water Engineering**, p. 142-171, 2003.

5 CONCLUSÕES GERAIS

De forma semelhante à complementaridade dos resultados encontrados na revisão da literatura de experimentos do primeiro artigo-capítulo, no qual os estudos clarearam-se reciprocamente em aspectos distintos, as abordagens nos demais artigos-capítulos, voltadas aos mesmos sistemas de aquecimento alternativos nos contextos tropicais, alcançou uma série de inferências não sempre de igual natureza, todavia interconexas, conclusões que esta 5ª seção sistematizará.

Três observações emolduram as inferências extraídas dos três primeiros estudos, a seguir dadas:

- i) Desde o início, dois prognósticos foram concebidos, o Cenário 1 (C_1), com a hipótese de que nenhuma medida fosse adotada contra os desperdícios de água dos SAS, e o Cenário 2 (C_2), com a hipótese de desperdício zero, ambas plausíveis em face de um possível comportamento tradicional ou, ao contrário, face à factibilidade de certas soluções ecoeficientes;
- ii) As inferências consideraram as emissões de Gás de Efeito Estufa (GEE) com base empírica, na forma de um estudo de caso regional, qual sejam nas proporções da matriz elétrica do NE, com geração hídrica de 25%, termelétrica 25%, eólica 30% e 20% importada (sobretudo hídrica);
- iii) Na comparação de algumas das alternativas não houve destaque de uma rota, quanto à sua economicidade, exigindo critérios de desempate, considerando as ecoeficiências hídricas e energéticas destes sistemas.

O primeiro estudo permitiu inferir que as energias renováveis eólica e solar têm grande potencial nas regiões tropicais e no NE brasileiro em particular e que, no C_1 , o SAS Convencional e de baixo custo são as rotas tecnológicas mais eficientes dentro destes contextos. Mais especificamente, desempenham melhor suas funções de aquecimento de água, com minimização de gastos com energia auxiliar, no Centro-Oeste e Norte do estado da Bahia. Fora delas gera mais impactos e o uso de versões híbridas, notadamente a que usa a queima de gás.

As questões do investimento inicial alto do SAS Convencional e tempo de *payback* são contornadas com desenvoltura pelos SAS de baixo custo, cuja eficiência é ligeiramente inferior. A principal dificuldade destes sistemas mais baratos é que sua durabilidade e funcionalidade prática dependem, em boa medida, da habilidade técnica da pessoa que o fabricará e instalará. Todavia, o SAS Convencional também exige mão-de-obra especializada, considerada escassa. Mas um de seus principais pontos críticos é a destinação pós-CV dos seus materiais, sem a LR. A estruturação cada vez mais ampla da cadeia de retorno destes SAS aos fabricantes é crucial.

Considerando todas as variáveis no cotejo dos sistemas, o SAS de baixo custo despontou como mais indicado nas regiões ensolaradas/tropicais de baixa renda, os SAS convencionais e híbridos em segundo lugar e as Bombas de Calor figuraram indicadas a regiões menos irradiadas como, na Bahia, as Centro-Leste e Sul.

Comparando as ecoeficiências determinísticas dos SAS, no C_2 , com o chuveiro elétrico, constatou-se que o SAS de PVC oferece 43% de economia global (água, energia, investimentos, custo de oportunidade e energia auxiliar), mas, curiosamente, que empatam em ambos os cenários o SAS Convencional e o SAS de PP, cabendo aos *policemakers* (elaboradores de políticas), *stakeholders* (beneficiários finais) e/ou *shareholders* (sócios e parceiros) decidirem, por algum critério exterior à eficiência (econômica), que sistema de aquecimento adotarão, face a preferências climáticas locais e tendências dos preços, com efeito cumulativo.

O segundo artigo reforça a inferência de que o critério da economicidade determinístico, ainda que relevante e imprescindível, não é tecnicamente suficiente para discernir entre as distintas rotas de aquecimento disponíveis, um dos principais resultados da investigação do primeiro capítulo, acrescentando aos cálculos os custos agregados em termos de dano ao macrosistema ecológico. Este resultado foi perturbador, pois são custos não-pagos ainda, mas superiores ao hoje pagos. Não dispomos de uma lei para os créditos de carbono, nem amadurecemos a mentalidade da economia de emissões, do que este artigo preconiza, de forma diferenciada, iniciar tal mudança. Nele já são usados custos de carbono compatíveis com o atendimento das metas de Marrakech.

Os resultados da aplicação do algoritmo determinístico retomado no terceiro capítulo, no cenário 2 (sem desperdícios hídricos) e considerando os custos do efeito estufa, são os a seguir dispostos:

- 1º) Empate técnico entre os SAS de baixo custo de Policloreto de Vinilo (PVC) e de Polipropileno (PP), com $I_{EEr} \cong 50 \%$; pelo critério de desempate da eficiência hídrica, os sistemas novamente são equivalentes; todavia, tanto pelo critério da eficiência energética quanto pelo de créditos de carbono, vence o SAS-PVC;
- 2º) Sistema de Aquecimento Solar Convencional (SAS-C), com $I_{EEr} \cong 36 \%$;
- 3º) Solar Heat Pump Systems (SHPS), com $I_{EEr} \cong 24 \%$;
- 4º) Air-Source Heat Pump (ASHS), com $I_{EEr} \cong 15 \%$; e
- 5º) Resistência Elétrica.

Tal hierarquização é o resultado das análises integradas nestes estudos, de modo determinístico.

Uma questão havia ficado em aberto, tocante às incertezas das análises, pelo que esta lacuna foi preenchida no quarto e penúltimo capítulo, que considerou as grandezas de entrada em PDF com distribuições de probabilidade, que por sua vez foram propagadas para as grandezas de saída: custos totais, unitários e EEI, através de $1e+6$ simulações de Monte Carlo. Inferiu-se que a os EEI estocásticos são, em todos os casos, maiores que os EEI determinísticos e que as estimações probabilísticas dos custos são iguais ou menores que as determinísticas, em coerência com a expectativa de redução dos consumos e desperdícios, considerando as probabilidades de ocorrência de famílias menores que as adotadas pela análise não-estocástica, bem como de menor comprimento das tubulações e menor número de banhos/dia, agregando realismo às inferências, ampliando seu raio de abrangência e elevando sua confiabilidade, com base nas novas premissas do Censo Demográfico e na faixa de conjuntos de zero a 12 andares. A hierarquia dos EEI não sofreu alterações entre as duas estimações determinística e estocástica, contudo a abordagem estocástica permite a avaliação da confiabilidade dos resultados; e pelo exposto a incerteza é relativamente pequena.

A literatura apresenta uma lacuna na avaliação de incerteza nas análises dos sistemas. É promissora a pesquisa nesta linha, que gere resultados metrológicos laboratoriais mais fiáveis. Uma outra linha promissora é a de análise de impacto do ciclo de vida cuidadosa dos sistemas, considerando-os adequadamente desde o processo de extração dos materiais para sua fabricação, sistema de suprimentos, fabricação, transporte, uso e manutenção, reuso e descarte. A estruturação dos sistemas de logística reversa é aguardada para os SAS, já sendo regulamentadas pelo Inmetro, mas, entre a realidade futura e a presente, cabem estudos retroes.

O chuveiro elétrico revelou ser uma tecnologia de barata aquisição e manutenção, mas operacionalmente custosa e ambientalmente deletéria. Os sistemas de aquecimento em regime de termossifão mostraram-se muito adequados à zona intertropical, com baixo consumo de energia auxiliar, especialmente nas regiões mais ensolaradas, minimizando as emissões de CO₂ a montante. O potencial macroeconômico das versões de baixo custo destes sistemas é ímpar mesmo nas regiões menos desenvolvidas. As bombas de calor revelaram-se versáteis, eficazes e merecedoras de industrialização em larga escala, para talvez torná-las muito mais acessíveis.

Como sugestões gerais de desenvolvimento das pesquisas constitutivas desta dissertação, face às incertezas e fronteiras das suas análises, seis linhas de pesquisa ficam indicadas como férteis:

1. Análise comparativa das curvas de custos acumulados dos sistemas, apontando médias, pontos de interseção com as de custos marginais, nivelamento destas com as de economias totais, sinalizando limites, inflexões e refinando os critérios decisórios;
2. Suplementação das análises com testes dos SAS híbridos termo-fotovoltaicos, por suas características de duplo ganho, com o resfriamento das células fotovoltaicas pela circulação da água fria, por convecção, em tubulação adjacente, elevando a eficiência destas células e acelerando a termossifão do sistema com o calor absorvido das mesmas células;
3. Qualificação laboratorial das grandezas das variáveis de entrada em futura Análise do Ciclo de Vida (ACV) dos sistemas, seleção das categorias de impacto mais relevantes, aplicação de testes de discernimento, em sucessivas rodadas, conforme a metodologia do Cone Invertido desenvolvida pelo TECLIM-UFBA;

4. Avaliação empírica das incertezas básicas e adicionais do software SimaPro e da Matriz Pedigree para futura ACV;
5. Testes de eficiência das Bombas de Calor no NE, Bahia e outros locais intertropicais;
6. Projeções de engenharia e custos da industrialização em escala das Bombas de Calor.

APÊNDICE A – Programação em R das SMC dos Seis Sistemas Analisados

Porque de maior interesse para programadores(as) e aplicadores(as) de sistemas informatizados, em sua forma editável, os conteúdos deste apêndice A e do B estão depositados no Repósitório Institucional de UFBA, com livre acesso, conforme o link a seguir:

I) Para acessar a programação completa em R, com 23 páginas, use este link:

<http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/26160>

II) Para acessar os histogramas em R das grandezas de entrada e saída, com 141 páginas, use este link: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/26160>

APÊNDICE B – Programação no Oracle® Crystal Ball das SMC dos Seis Sistemas Analisados

Porque de maior interesse para programadores(as) e aplicadores(as) de sistemas informatizados, em sua forma editável, os conteúdos deste apêndice B e do A estão depositados no Repósitoário Institucional de UFBA, com livre acesso, conforme o link a seguir:

Para acessar a planilha em Excell, com a programação e o relatório completo das SMC com o Crystal Ball, use este link: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/26160>

UFBA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA
CEP: 40.210-630
Telefone: (71) 3283-9800
E-mail: pei@ufba.br
Home page: <http://www.pei.ufba.br>

