

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE
AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA PARA UMA PISCINA COBERTA

por

Matheus Fernando Margoni Lengler

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, abril de 2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Lengler, Matheus Fernando Margoni
DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA
DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA PARA UMA PISCINA COBERTA
/ Matheus Fernando Margoni Lengler. -- 2023.
25 f.
Orientadora: Leticia Jenisch Rodrigues.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Energia Solar Térmica. 2. Sistema de
Aquecimento. 3. Piscina Coberta. I. Rodrigues, Leticia
Jenisch, orient. II. Título.

Matheus Fernando Margoni Lengler

DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE
AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA PARA UMA PISCINA COBERTA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues (Presidente)

Porto Alegre, abril de 2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo aos meus pais, Ana e Carlos, que sempre me incentivaram e me proporcionaram tudo que precisei para estar aqui. Ao meu irmão, Gabriel, que aguenta as crises e nunca deixou de estar presente, seja salvando aranhas ou borboletas que entram no quarto, possivelmente a pessoa mais doce que existe. Aproveito a oportunidade para ressaltar, amo vocês.

Agradeço também aos animais de estimação que me acompanharam durante a graduação, mas que infelizmente partiram antes de eu ter mais tempo para vocês, Bela e Luna.

Agradeço a minha namorada, Alessa, que por vezes me ouve falar de coisas que não entende de engenharia (sendo sincero, muitas vezes nem eu entendo). Amo você.

Por fim, agradeço a minha orientadora, Leticia, que me ajudou com cada vírgula deste trabalho, sem esta ajuda o trabalho não ficaria pronto, e à UFRGS, que me deu amigos incríveis, Ana, Cauê, Guilherme e Lorenzo, conhecimento e, o mais importante, autonomia e independência.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2023

DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE
AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA PARA PISCINA COBERTA

Lengler, Matheus

matheus.lengler@hotmail.com

Resumo. *O presente trabalho dimensiona um sistema de aquecimento solar de água (SAS) para uma piscina coberta e um conjunto de chuveiros localizados em uma academia de Porto Alegre. O objetivo é avaliar o comportamento do sistema, com a utilização do SAS suprindo parcialmente a fonte auxiliar (caldeira) ao longo de um ano. Para tanto, é utilizado um método baseado na ISO/TR 12596: 1995, que avalia exclusivamente as perdas de energia da piscina, e também um modelo simulado, através do software T*SOL, que analisa o sistema completo, composto pela piscina e chuveiros. A estrutura física da academia permite a instalação de 400 m² de coletores (400 coletores com área de 1 m²), sem que haja sombreamento entre eles. A simulação final, considerando a totalidade de coletores, demonstra que 64% de toda a demanda energética poderia ser suprida pela fonte solar. O custo para implementação deste sistema é estimado em R\$ 390.000,00, resultando em um payback de aproximadamente seis anos, e um LCoH 8% inferior ao relativo ao uso exclusivo da caldeira.*

Palavras-chave: *sistema de aquecimento solar, piscina coberta, T*SOL, energia solar térmica aplicada, LCoH*

DIMENSIONING AND ENERGY ANALYSIS OF A SOLAR WATER HEATING SYSTEM FOR AN INDOOR SWIMMING POOL

Abstract. *The present work designs a solar water heating system (SS) for an indoor swimming pool and a set of showers located in a gym in Porto Alegre. The objective is to evaluate the behavior of the system, with the use of SAS partially supplying the auxiliary source (boiler) over a year. For that, a method based on ISO/TR 12596: 1995 is used, which exclusively evaluates the energy losses of the pool, and also a simulated model, through the T*SOL software, which analyzes the complete system, composed by the swimming pool and showers. The physical structure of the academy allows the installation of 400 m² of collectors (400 collectors with an area of 1 m²), without shading between them. The final simulation, considering all collectors, shows that 64% of all energy demand could be supplied by solar power. The cost of implementing this system is estimated at BRL 390,000.00, resulting in a payback of approximately six years, and an LCoH 8% lower than that related to the exclusive use of the boiler.*

Keywords: *solar heating system, indoor swimming pool, T*SOL, applied solar thermal energy, LCoH*

NOMENCLATURA

Símbolos

A_p	Área da piscina	[m ²]
A_{col}	Área dos coletores	[m ²]
A_t	Área do tanque em contato com água	[m ²]
C_t	Custos com manutenção	[R\$]
cp_w	Calor específico da piscina	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
E_t	Energia total anual	[kWh]
f	Fração solar	
f_{IAM}	Modificador do ângulo de incidência	
G_{diff}	Irradiância difusa no coletor	[W m ⁻²]
G_{dir}	Irradiância direta no coletor	[W m ⁻²]
h_{fg}	Calor latente de vaporização da água	[MJ kg ⁻¹]
I_o	Investimento inicial	[R\$]
k_e	Coefficiente de transferência de calor na parede da piscina	[W m ⁻² K ⁻¹]
k_o	Constante primária de transferência de calor no coletor	[W m ⁻²]
k_q	Constante secundária de transferência de calor no coletor	[W m ⁻² K ⁻¹]
\dot{m}	Fluxo de massa na piscina	[kg m ⁻²]
P_a	Pressão de vapor de água no ambiente	[kPa]
P_o	Pressão atmosférica	[kPa]
p_w	Pressão de saturação do vapor de água acima da piscina	[kPa]
p_{enc}	Pressão parcial de vapor da água	[kPa]
p_s	Pressão de saturação do vapor de água no ambiente	[kPa]
\dot{Q}_k	Perda instantânea por convecção	[W]
\dot{Q}_m	Perda instantânea por refil	[W]
\dot{Q}_s	Perda instantânea por radiação térmica	[W]
\dot{Q}_t	Perda instantânea por condução	[W]
\dot{Q}_v	Perda instantânea por evaporação	[W]
Q_{aux}	Energia total útil gerada pela caldeira	[MJ]
Q_c	Perda por convecção	[MJ m ⁻²]

Q_e	Perda por evaporação	[MJ m ⁻²]
Q_{mku}	Perda por retil	[MJ m ⁻²]
Q_r	Perda por radiação térmica	[MJ m ⁻²]
Q_{sol}	Energia total útil gerada pelos coletores	[MJ]
r	Taxa de juros	
T_a	Temperatura do ar	[K]
$T_{c,2}$	Temperatura do fluido frio após passar pelo trocador	[K]
T_{enc}	Temperatura no entorno da piscina	[K]
$T_{h,1}$	Temperatura do fluido quente após passar pelo trocador	[K]
T_w	Temperatura da água da piscina	[K]
T	Tempo de avaliação	[Anos]
T_{km}	Temperatura na superfície do coletor	[K]
T_{mku}	Temperatura da água de retil	[K]
UR	Umidade relativa no entorno da piscina	
V_w	Volume da piscina	[m ³]
V_s	Velocidade do ar	[m s ⁻¹]
Símbolos gregos		
ΔT	Diferença de temperatura entre a piscina e o ambiente	[K]
$\Delta T_{lm,cf}$	Diferença de temperatura média logarítmica	[K]
ΔT_m	Diferença entre as temperaturas de retil e da piscina	[K]
ε_w	Emissividade de onda longa da água	
η	Rendimento dos coletores	
ρ_w	Massa específica da água	[kg m ⁻³]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W m ⁻² K ⁻⁴]
Abreviaturas e acrônimos		
<i>AEA</i>	Aquatic Exercise Association	
<i>FINA</i>	Federação Internacional de Natação	
<i>LCoH</i>	Levelized Cost of Heat	
<i>LMTD</i>	Log Mean Temperature Difference	
<i>SAS</i>	Sistema de Aquecimento Solar	
<i>TC</i>	Trocador de calor	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	FUNDAMENTAÇÃO E CASO ESTUDADO	9
2.1	Modelo ISO/TR 12596	9
2.2	Modelo Simulado.....	11
2.2.1	Coletores Solares.....	11
2.2.2	Trocadores de calor (TC)	12
2.2.3	Piscina	12
2.2.4	Chuveiros	13
2.2.5	Fração solar	14
3	METODOLOGIA	14
3.1	Caso estudado	14
3.2	Cálculo estimado da quantidade de coletores	15
3.3	Modelo Simulado.....	16
3.4	Carga total no telhado	18
3.5	Análise de viabilidade econômica	18
4	RESULTADOS.....	18
4.1	Modelo ISO/TR 12596	19
4.2	Modelo Simulado.....	19
4.2.1	Verificação do modelo	19
4.2.2	Resultados do modelo	20
4.3	Análise financeira	22
5	CONCLUSÃO	23
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
	ANEXO A – Dados climáticos para Porto Alegre	25

1 INTRODUÇÃO

Dada a necessidade de aquecimento de piscinas para a prática de natação ao longo de todo o ano, atrelada à constante busca para diminuição de custos e à conscientização ambiental, os coletores solares tornam-se uma aplicação atraente. Possuem uma vida útil de, aproximadamente, 20 anos e pouca manutenção, o que acarreta em uma vantagem em relação aos sistemas de aquecimento convencionais.

Smith et al., 1994, determinaram que o comportamento termodinâmico de uma piscina pode ser definido em função de suas perdas de energia. Já Almanza e Lara, 1994, desenvolveram um modelo para determinar a energia necessária para manter a temperatura constante em uma piscina externa, baseado no balanço de energia. O método foi aplicado na Cidade do México, e levou a conclusão de que, para uma piscina com 300 m³, é necessário, em média, 267 W/m² para manter a piscina em uma temperatura de 28 °C.

Gonçalves et al., 2019, avaliaram a performance de diferentes conjuntos de coletores solares, em quatro cidades diferentes do Brasil, para uma piscina externa de 250 m², cuja temperatura de *set point* era de 30°C. Utilizando o método da utilizabilidade, que consiste em avaliar a fração solar associada ao uso de coletores térmicos, e o método ANOVA, para análise estatística, concluíram que, para Porto Alegre, 150 m² de coletores não seriam suficientes para manter a piscina na temperatura desejada ao longo do ano. De fato, seriam necessários em torno de 400 m² de coletores para obter uma fração solar equivalente a 50%.

Lugo et al., 2019, desenvolveram um modelo matemático para simular a temperatura de uma piscina externa aquecida por coletores solares, o qual é utilizado no software TRNSYS. O modelo comparou seis equações empíricas para a perda evaporativa, chegando a um erro médio de ± 0,41%, com uma diferença média na temperatura de ± 0,12 °C. O modelo é utilizado até hoje.

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo principal dimensionar um sistema de aquecimento solar de água, SAS, para uma academia que possui duas piscinas internas (cobertas) e um conjunto de chuveiros. Atualmente, é utilizada apenas uma caldeira que queima lenha e *pellets*. A quantidade de coletores ficou restrita à área disponível para a instalação, i.e., a área total do telhado. Além disso, também foi avaliado o carregamento imposto ao telhado devido à presença das estruturas e coletores. Com os dados da geração de energia térmica (energia fornecida ao aquecimento da água), foram realizadas análises de viabilidade econômica, que buscaram avaliar a viabilidade financeira do projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO E CASO ESTUDADO

No presente trabalho, a fundamentação foi separada em duas partes, as quais diferem pela forma de cálculo abordada para a resolução do problema, de forma simplificada (através da ISO/TR 12596) e através de um modelo simulado (utilizando software).

2.1 Modelo ISO/TR 12596

A abordagem baseada na norma teve como objetivo encontrar a quantidade de coletores solares que seria necessária para suprir toda energia demandada para manter a piscina a uma temperatura determinada (temperatura de *set point*). Na norma ISO/TR 12596: 1995 (ISO, 1995) – *Solar heating Swimming-pool heating systems: Dimensions, design and installation guidelines* – no Anexo A, são apresentadas as trocas térmicas que ocorrem na piscina. A perda por evaporação, Q_e , em MJ/m², é dada por:

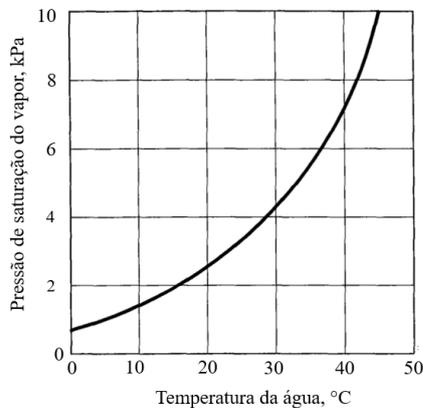
$$Q_e = [5,64 + (5,96V_s)](p_w - p_{enc}) \quad (1)$$

na qual V_s é a velocidade do ar na superfície da piscina, em m/s, normalmente entre 0,02 e 0,05 m/s, p_w é a pressão de saturação de vapor de água na temperatura da piscina, em kPa, obtida através da Figura 1 - identificando o valor de temperatura da água no eixo horizontal - e p_{enc} é a pressão parcial de vapor de água no ambiente da piscina, em kPa, a qual pode ser obtida através de

$$p_{enc} = p_s UR \quad (2)$$

na qual p_s é a pressão de saturação de vapor de água avaliada na temperatura do entorno da piscina, em kPa, e UR é a umidade relativa no ambiente, adimensional. O valor de p_s pode ser obtido através da Figura 1, sendo a variável de entrada (eixo horizontal) o valor da temperatura do entorno.

Figura 1 – Obtenção de p_w através da temperatura da água



Fonte: ISO/TR 12596 adaptado (ISO, 1995)

De acordo com Chow et al. (2012), a perda por evaporação é maior caso haja nadadores na piscina, pois a área de contato entre o ar e a água é aumentada. A norma ISO/TR 12596 (ISO, 1995) prediz que, para uma piscina com um grande número de nadadores, as perdas por evaporação podem aumentar em até 100%.

A norma ISO/TR 12596 (ISO, 1995) ainda define outras três perdas associadas a mecanismos de transferência de calor distintos. São elas: a radiação térmica, a convecção entre piscina e ambiente, e a transferência de calor por convecção devido à entrada de água da rede, em menor temperatura (para manter o volume da piscina e garantir a segurança sanitária). O volume de água da rede que entra no sistema será denominado refil - referente à renovação da água. As magnitudes das perdas citadas, em MJ/m², podem ser determinadas através de

$$Q_r = 0,086 \varepsilon_w \sigma (T_w^4 - T_{enc}^4) \quad (3)$$

na qual, ε_w é a emissividade de onda longa da água, com valor recomendado pela ISO/TR 12596 (ISO, 1995) de 0,95, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor é $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴, T_w é a temperatura da água, em K, e T_{enc} a temperatura no entorno da piscina, em K;

$$Q_c = 0,086(3,1 + 4,1V)(T_w - T_a) \quad (4)$$

na qual, V é a velocidade do vento acima da piscina, em m/s, e T_a é a temperatura do ar no ambiente, em K;

$$Q_{mku} = \frac{Q_c}{h_{fg}} C_p |T_{mku} - T_w| \quad (5)$$

na qual, h_{fg} é o calor latente de vaporização da água, em MJ/kg, C_p é o calor específico da água, em J/kgK, e T_{mku} é a temperatura da água a ser inserida na piscina, em K.

Hahne e Kluber (1994) demonstraram que a perda de calor por condução, através do contato com o piso, corresponde a menos de 1% da perda de calor total. Por este motivo, esta perda foi desconsiderada em todos os cálculos. Zuccari et al. (2018) concluíram que 60% das perdas totais decorriam apenas da parcela de evaporação. A presença de nadadores poderia aumentar ainda mais essa proporção. Assim, esta parcela torna-se a mais relevante no balanço.

Uma vez definidas as perdas envolvidas no processo, foi realizado o balanço de energia, levando em consideração a eficiência dos coletores solares, com objetivo de encontrar a área total de coletores que seria necessária para suprir integralmente a energia demandada pelas piscinas. Através da equação abaixo foi possível determinar a quantidade de coletores do sistema de aquecimento solar de água,

$$A_{col} = \frac{A_p \sum Q_n}{\bar{H} \eta} \quad (6)$$

na qual A_p é a área superficial das piscinas, em m^2 , $\sum Q_n$ é o somatório de todas as perdas por transferência de calor, em MJ/m², \bar{H} é a irradiação solar direta média diária anual, em MJ/m², e η é a eficiência dos coletores solares térmicos.

Ressalta-se que as hipóteses simplificadoras adotadas no modelo baseado na ISO/TR 1296 são as seguintes: (I) desconsideração da perda por condução; (II) temperatura constante na piscina; (III) temperatura fixa do ambiente; (IV) temperatura fixa da água utilizada para refil; e (V) ausência de nadadores.

2.2 Modelo Simulado

A seguir são detalhados os balanços térmicos e demais definições para cada componente do sistema.

2.2.1 Coletores Solares

A energia absorvida pelos coletores, já deduzidas as perdas ópticas e térmicas (transferência de calor por radiação para o ambiente) é dada por

$$P = G_{dir} \eta f_{IAM} + G_{diff} \eta_o f_{IAM_{diff}} - k_o (T_{km} - T_A) - k_q (T_{km} - T_A)^2 \quad (7)$$

na qual, G_{dir} é a irradiância direta incidente no coletor, em W/m², e f_{IAM} é o ângulo de incidência modificado, adimensional. Parcelas análogas para a componente difusa da radiação são G_{diff} , em W/m², e $f_{IAM_{diff}}$. Por fim, k_o e k_q são constantes relacionadas ao coeficiente de transferência de calor, em W/m²K e W/m²K², respectivamente, e T_{km} e T_A são as temperaturas na superfície do coletor e do ambiente, em K, respectivamente.

2.2.2 Trocadores de calor (TC)

Para estimar a temperatura do fluido que sai do TC, $T_{c,2}$, em direção à piscina ou ao chuveiro – após a passagem pelo TC – o software utiliza o método conhecido como LMTD (Método da Diferença de Temperatura Média Logarítmica, em inglês, *Log Mean Temperature Difference*) considerando um TC do tipo contracorrente, isto é,

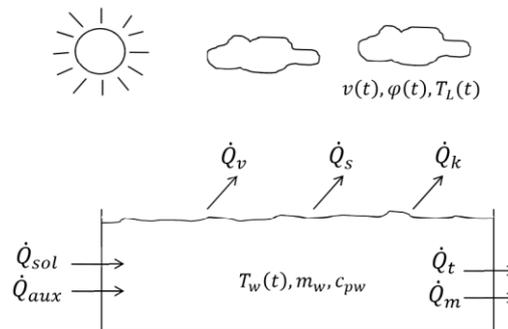
$$\Delta T_{lm,cf} = T_{h,1} - T_{c,2} \quad (8)$$

na qual, $T_{h,1}$ é a temperatura do fluido quente, oriundo da caldeira ou do coletor solar, antes de circular no TC, e $\Delta T_{lm,cf}$ é a diferença de temperatura média logarítmica, ambas em K. O software permite ao usuário informar a $\Delta T_{lm,cf}$ desejada, definindo, então, a temperatura $T_{c,2}$, em K.

2.2.3 Piscina

De maneira análoga àquela apresentada na Seção 2.1, o balanço de energia realizado pelo T*SOL¹ (T*SOL, 2021) dá-se através da comparação entre os ganhos de energia, advindos dos coletores e da caldeira, e as perdas por radiação térmica, evaporação, convecção, condução, e a perda devido à entrada de água da rede (fria) no sistema. A Figura 2 ilustra o balanço térmico citado.

Figura 2 – Balanço térmico da piscina



Fonte: Documentation T*SOL adaptado (T*SOL, 2021)

A partir do balanço térmico é possível determinar a taxa de variação temporal da temperatura das piscinas, dada por

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{\sum \dot{Q}_i}{c_{pw} \rho_w V_w} \quad (9)$$

na qual T_w é a temperatura da piscina, em K, $\sum \dot{Q}_i$ é o somatório das perdas e ganhos de energia, em W, c_{pw} é o calor específico da água piscina, em J/kgK, ρ_w é a massa específica da água, em kg/m³, e V_w é o volume total da piscina, em m³. A parcela advinda do aquecimento auxiliar, que deve ser usado em conjunto com os coletores solares, refere-se ao uso de uma caldeira à base de lenha e *pellets* (conforme será explicado na Seção 3.1).

Além disso, as perdas de energia, em W, são determinadas através das equações abaixo, ordenadas por mecanismo de transferência de calor e massa, i.e., radiação térmica, evaporação, convecção, condução e refil, respectivamente,

¹ Foi utilizada a versão gratuita do software para o desenvolvimento deste artigo.

$$\dot{Q}_s = \varepsilon_w \sigma A_p (T_w^4 - T_H^4) \quad (10)$$

na qual, ε_w é a emissividade de onda longa da água, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, A_w é a área da piscina, em m^2 , T_w é a temperatura da água piscina e T_H é a temperatura do ambiente, ambas em K;

$$\dot{Q}_v = (0,089 + 0,782v)A_w\Delta p \quad (11)$$

na qual v é a velocidade do vento na superfície da piscina, em m/s, e Δp é a diferença de pressão entre a pressão de vapor da água na superfície da piscina e a pressão de vapor da água no ambiente, em kPa;

$$\dot{Q}_k = 61,3\dot{Q}_v \frac{P_a \Delta T}{P_0 \Delta p} \quad (12)$$

na qual P_a e P_0 são, respectivamente, a pressão de vapor da água no ambiente e a pressão atmosférica, em kPa, e ΔT é a diferença de temperatura entre a superfície da água e o ambiente em K;

$$\dot{Q}_t = k_e A_B \Delta T \quad (13)$$

na qual k_e é o coeficiente de transferência de calor das superfícies da piscina (inferior e laterais), em W/m^2K , e A_B é a área total das superfícies que possuem perda por condução, em m^2 ;

$$\dot{Q}_m = \dot{m} c p_w \Delta T_m \quad (14)$$

na qual \dot{m} é o fluxo de massa, em kg/m^2 , Cp_w é o calor específico da água, em J/kgK , e ΔT_m é a diferença entre a temperaturas de refil e a temperatura da água da piscina, em K.

2.2.4 Chuveiros

Além das piscinas, os chuveiros também necessitam de aquecimento, seja proveniente dos coletores solares ou da caldeira. Para tanto, foi realizado o balanço de energia no tanque de armazenamento, uma vez que o modelo, conforme será abordado em tópicos futuros, não inclui as perdas de carga na tubulação entre o tanque e o destino - chuveiro ou piscina. Consequentemente, a temperatura resultante no tanque de armazenamento foi considerada igual à temperatura final dos chuveiros. A partir do balanço de energia realizado no tanque, é possível determinar a taxa temporal de variação da temperatura no tanque, i.e.,

$$\frac{dT_t}{dt} = \frac{\sum \dot{Q}_i}{c p_t \rho_t V_t} \quad (15)$$

na qual, T_t é a temperatura no tanque, em K, $\sum \dot{Q}_i$ é o somatório das perdas de calor, por condução e através das conexões, e dos ganhos de energia térmica através da água quente oriunda dos coletores e da caldeira, em W, Cp_t , ρ_w , e V_w são, respectivamente, o calor específico, a massa específica e o volume total, referentes à água no tanque, todos em unidades SI.

O equacionamento das perdas por condução, é dado por

$$\dot{Q}_t = k_e A_t \Delta T \quad (16)$$

na qual k_e é o coeficiente de transferência de calor da parede do tanque, em $\text{W/m}^2\text{K}$, A_t é a área total em contato com a água, em m^2 , e ΔT é a diferença de temperatura entre a água do tanque e o ar do lado externo, em K.

2.2.5 Fração solar

Por fim, uma importante definição acerca do projeto é a fração solar. De acordo com Kalogirou (2016), a fração solar é a razão entre a energia fornecida pelo sistema de coletores solares e a energia total entregue ao sistema,

$$f = \frac{Q_{sol}}{Q_{sol} + Q_{aux}} \quad (17)$$

na qual, Q_{sol} é a energia útil total provida pelos coletores e Q_{aux} é a energia total gerada pela caldeira, ambas em MJ. A Eq. (17) pode ser aplicada individualmente ao sistema de aquecimento da piscina, ao sistema de aquecimento dos chuveiros, ou ao conjunto de ambos os sistemas.

Ressalta-se que as hipóteses simplificadoras adotadas no modelo simulado são as seguintes: (I) ausência de nadadores; e (II) temperatura a ser atingida constante de 30°C e 37°C para piscina e chuveiros, respectivamente.

3 METODOLOGIA

Nesta seção é detalhada a metodologia utilizada para responder a questão-foco do trabalho.

3.1 Caso estudado

O presente estudo foi realizado em uma academia localizada na zona Sul de Porto Alegre, a qual conta com duas piscinas com tamanhos distintos - uma voltada ao público infantil, cuja área superficial é de 42 m^2 , e outra semiolímpica, com área superficial de 350 m^2 . Ambas possuem profundidade de $1,5 \text{ m}$, chegando-se ao volume total de 588 m^3 , quando completamente preenchidas por água.

Além das piscinas, o local possui 30 chuveiros disponibilizados de forma que os alunos possam tomar banho após a prática de natação. Para determinar a demanda de água necessária, foi estimado que a academia possui cerca de 220 alunos diários. Para fins de simplificação, sempre que houver referência a alunos ao longo do texto, esta se refere apenas à prática de natação, não levando em consideração outros esportes disponíveis (hidroginástica, hidrobike, etc.). Além disso, foi considerado o uso dos chuveiros por 10 minutos a cada banho. De acordo com Belinazo (2004), um banho possui uma vazão de aproximadamente $0,1 \text{ L/s}$, ou 6 L/min , totalizando 13.200 L/dia , ou $13,2 \text{ m}^3/\text{dia}$.

Para suprir a demanda apresentada acima, a academia realiza a queima de uma mistura de *pellets* de madeira e lenha. A água aquecida é mantida em um tanque de armazenamento – cuja capacidade é de 3.000 L de água. Posteriormente, a mesma é entregue às piscinas e aos chuveiros. A Figura 3a ilustra o aquecimento dos *pellets*, à esquerda, e o boiler, centralizado.

A área do telhado considerada para a instalação dos coletores é apresentada na Figura 3b. Foram considerados 750 m^2 disponíveis para o projeto. No entanto, ressalta-se a disponibilidade de espaço extra - a academia tem possibilidade de construir um estacionamento coberto, de maneira que a área total para o projeto seja maior.

A Tabela 1 apresenta as informações referentes à quantidade de material necessária para garantir o aquecimento esperado, bem como o poder calorífico de cada material (informado

pelo fabricante – assumindo que o material está seco), a energia mensal total, e o custo atribuído ao material.

Figura 3 – (a) Sistema de aquecimento da piscina (à esquerda); e (b) Área total disponível para o projeto, 50 m x 15 m, totalizando 750 m²



Fonte: (a) Autor e (b) Google Maps, 2022

As temperaturas cujo sistema de aquecimento deve manter são, também, informações fundamentais para a simulação. Para o uso do chuveiro, de acordo com informação disponibilizada pelo Ministério de Educação, por meio da médica Camilla de Barros Borges (MEC, 2017), a temperatura ideal para banho é entre 29°C e 38°C. Portanto, adota-se uma temperatura de 37°C como parâmetro utilizado. Já para o uso da piscina, de acordo com a regra FR 2.11 da Federação Internacional de Natação (FINA, 2023), a temperatura da água deve se situar entre 25°C e 28°C. No entanto, uma vez que há disponibilidade da prática de natação para um público com menos de 4 anos de idade, a AEA (*Aquatic Exercise Association*) recomenda que a temperatura esteja na faixa de 32,2°C a 33,9°C (AEA, 2020). Por tais motivos, foi considerada a temperatura das piscinas igual a 30°C. Além disso, a temperatura considerada no entorno da piscina foi estimada em 25°C.

Tabela 1 – Consumo, poder calorífico superior e energia entregue pelos pellets e lenha

	Quantidade (kg/mês)	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	Energia Mensal (MJ/mês)	Valor Mensal (R\$)
<i>Pellets</i>	2.000	20	40.000	1.630,00
Lenha	30.000	15	450.000	6.500,00
Total	32.000	-	490.000	8.130,00

Fonte: Autor

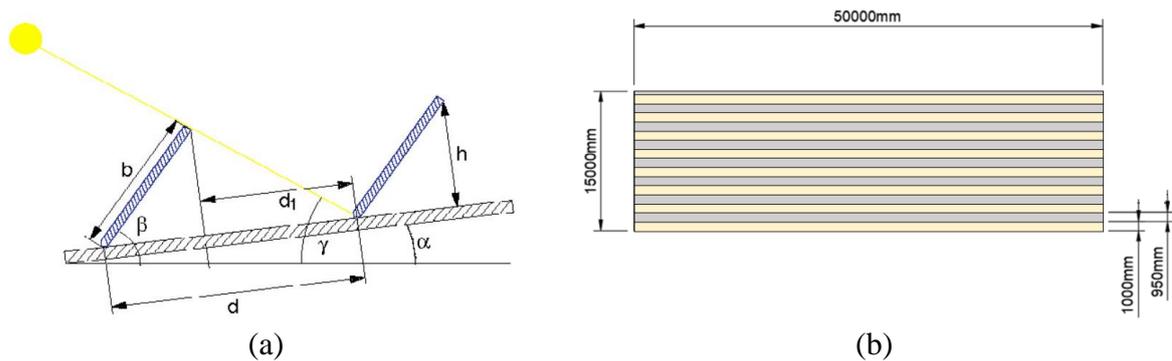
3.2 Cálculo estimado da quantidade de coletores

Tendo em vista a área total disponível para a instalação dos coletores, fez-se uma estimativa de área que pode de fato ser ocupada, levando-se em consideração a distância mínima entre os coletores, de forma a evitar o sombreamento entre as fileiras. A Figura 4a apresenta o diagrama

das fileiras de coletores, na qual d_1 é a distância mínima entre os coletores, em m, b é o comprimento do coletor, 1 m, β é a inclinação do coletor em relação a horizontal, $\beta = 45^\circ$, α é a inclinação do telhado, ($\alpha = 0^\circ$) e γ é o ângulo entre os raios solares e a horizontal ($\gamma = 36,53^\circ$).

Através de cálculos trigonométricos, pôde-se determinar a distância $d_1 = 0,95$ m, e, considerando um coletor de área padrão, 1 m^2 , uma distância $d = 1,66$ m. Uma vez que o telhado tem dimensões de $50 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ (conforme Figura 3b), distribuiu-se os coletores em fileiras de 50 unidades lado-a-lado, resultando em 400 coletores, Figura 4b.

Figura 4 – (a) Diagrama para cálculo da distância entre coletores e (b) Distribuição dos coletores (destaque em amarelo) no telhado



Fonte: (a) T*SOL (T*SOL, 2021) e (b) Autor

3.3 Modelo Simulado

O software utilizado chama-se T*SOL (T*SOL, 2021) e é capaz de simular diversos sistemas de aquecimento para água de uso doméstico, para piscinas, tanto internas quanto externas, e aquecimento de ambientes; tanto através de caldeiras - com combustível a ser selecionado - quanto através de coletores solares térmicos. Além disso, é possível avaliar a incidência de sombra no local, a inserção de trocadores de calor, e outros parâmetros abordados a seguir.

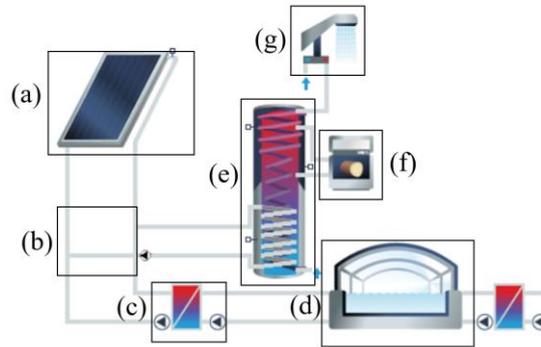
Esse modelo teve como objetivo determinar a demanda térmica e a respectiva energia entregue. Para tanto foi avaliada a diminuição do combustível já utilizado para aquecimento, de forma que a soma da energia gerada pelos coletores e pela caldeira – com menos combustível – fosse mantida igual ao uso integral da caldeira. A Figura 5 apresenta o diagrama dos componentes utilizados.

Foram utilizados coletores do tipo placa plana, com 1 m^2 de área, orientados para o Norte, com uma inclinação de 45° , conforme sugerido por Kalogirou (2016). Os dados climáticos utilizados no modelo são apresentados no Anexo A.

Para a tubulação, foram considerados 12 m de tubos dentro da academia e 64 m no telhado, os quais possuem condutividade térmica ($0,045 \text{ W/mK}$) e diâmetro ($0,125 \text{ m}$) padrões do software. O fluido em circulação é água, $C_p = 4180 \text{ J/kgK}$ constante, e velocidade de $0,5 \text{ m/s}$. A tubulação também possui um controle que direciona a água aquecida para a demanda que possuir a menor temperatura de retorno – entre chuveiros e piscinas.

Foram necessários 4 trocadores de calor: entre a tubulação do coletor e a piscina, entre a caldeira e a piscina, interno ao tanque de armazenamento e ligado aos coletores, e interno ao tanque de armazenamento e ligado à caldeira. Todos utilizaram o mesmo método para determinar a taxa de transferência de calor, Eq. (8), sendo $\Delta T_{lm,cf} = 10 \text{ K}$.

Figura 5 – Diagrama utilizado para o modelo simulado. (a) coletores solares, (b) tubulação, (c) trocador de calor, (d) piscina, (e) tanque de armazenamento, (f) caldeira, (g) chuveiros



Fonte: T*SOL adaptado (T*SOL, 2021)

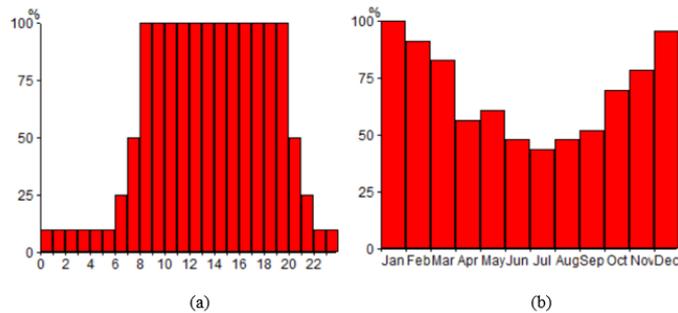
De acordo com Chow et al (2012), o percentual diário de renovação da água da piscina deve estar entre 5% e 10% do volume total. Neste trabalho foi utilizado um percentual médio, 7,5%, que corresponde a 42 L. O período de utilização das piscinas se dá entre os dias 05/jan a 23/dez, somente para dias úteis, no horário entre 08:00 e 20:00. A temperatura de *set point* utilizada foi de 30°C, podendo-se atingir uma temperatura máxima de 32°C. A temperatura do ambiente foi fixada em de 25°C e a umidade relativa em 85%.

No local já há tanque de armazenamento de 3000 L. Assumiu-se que o mesmo conta com dois TC. A espessura do tanque foi considerada igual a 0,1 m, com condutividade térmica de 0,065 W/mK. O tanque suporta uma temperatura máxima de 90°C e possui um sensor de controle, que desliga a conexão com os coletores quando a temperatura interna atinge 90% dessa temperatura máxima.

Foi considerada uma demanda de energia mensal de 490.000 MJ, ou 136.111 kWh, levando-se em consideração apenas o período no qual as piscinas são usadas. Assumindo que um mês possui 22 dias úteis, e que a caldeira fica em operação por 16h – considerando o tempo em que ela deve aquecer, e resfriar após o funcionamento – chega-se a uma potência de 385 kW, aproximadamente. A eficiência média da caldeira é de 85%, valor médio recomendado pelo software. No entanto é válido ressaltar que a eficiência real pode ser ainda menor.

A utilização dos chuveiros segue, também, o padrão de utilização da piscina. No entanto, o padrão de distribuição do uso ao longo do dia segue o modelo *indoor pool* (T*SOL, 2021). A Figura 6a apresenta a distribuição diária e a Figura 6b a média mensal de utilização. Ainda com relação a Figura 6b, é possível observar que a utilização dos chuveiros decai nos meses de inverno, podendo chegar a 43,5%. Esse efeito ocorre porque durante esse período há menos procura pela prática de natação. Já para o uso diário, 100% da utilização ocorre no intervalo das 08h às 20h.

Figura 6 – (a) Distribuição diária da utilização dos chuveiros; (b) Distribuição média mensal da utilização dos chuveiros



Fonte: T*SOL, 2021

3.4 Carga total no telhado

Para avaliar se a estrutura do telhado suportaria o carregamento imposto pelos coletores e pela estrutura de fixação, foi utilizada a norma a NBR 6120 (ABNT, 2019), item 6.2, que discrimina a carga variável para diversos tipos de estruturas. Segundo a norma, na categoria ginásio de esportes, a carga máxima uniformemente distribuída deve ser de 5 kN/m². Considerando-se um coletor solar padrão de 10 kg e um número total de 400 unidades, chega-se a uma carga total de 39.240 N. Ao ser dividida pela área total, tem-se 0,052 kN/m². Assumindo um coeficiente de segurança igual a 2, chega-se em um valor de 0,11 kN/m², o qual encontra-se abaixo do valor indicado pela norma.

3.5 Análise de viabilidade econômica

Para esta análise, utilizou-se o *payback* simples (Short, 2019), que determina o tempo de retorno do investimento. Além desse, foi utilizado o LCoH (Custo Nivelado de Calor, em inglês *Levelized Cost of Heat*), dado em R\$/kWh. Esse indicador compara o custo da energia entre duas fontes distintas, considerando o valor de investimento necessário para a implementação. A comparação em questão foi realizada entre o uso total da caldeira e o uso de coletores solares auxiliados pelo uso parcial da caldeira. Segundo SHC (2018),

$$LCoH = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (18)$$

na qual, para os coletores, I_0 é dado pelo investimento inicial, em R\$, C_t representa os custos gerais com manutenções ao longo de um ano, em R\$, E_t é a energia útil total anual, em kWh, r é a taxa de juros, e T o tempo total para a avaliação. Para a parcela referente a caldeira, não há custo de investimento, e C_t pode ser definido como o somatório de custos relacionados à compra de combustível e à operação (funcionários).

4 RESULTADOS

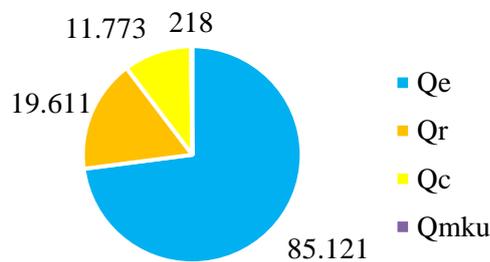
A seguir são detalhados os resultados obtidos no método da ISO/TR 12596, no modelo simulado e na análise financeira.

4.1 Modelo ISO/TR 12596

Conforme mencionado na Seção 2.1, a abordagem baseada na ISO/TR 12596 consistiu em encontrar o número de coletores necessários para atender toda a demanda térmica da piscina. As perdas associadas podem ser vistas na Figura 7.

Somando-se todas as perdas, o valor mensal correspondente é de 117 GJ, que deve ser o valor de energia entregue pelo coletor para cobrir as perdas da piscina. Aplicando a Eq. (6), considerando uma eficiência de 80%, a área total é de 270 m². No entanto, de acordo com a Seção 3.2, é sabido que, para coletores padrão de 1 m², o espaço disponível seria de 400 m². Neste cálculo simplificado não foi considerada a demanda térmica dos chuveiros e as eventuais perdas de calor devido à tubulação e ao tanque de armazenamento.

Figura 7 – Valores obtidos para as perdas, em MJ



Fonte: Autor

4.2 Modelo Simulado

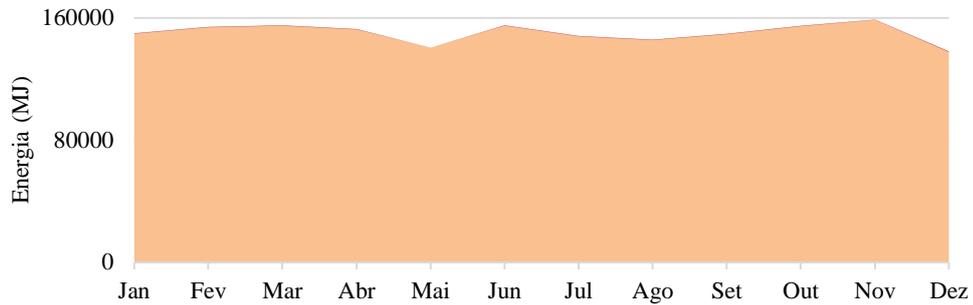
Nessa seção apresenta-se a verificação do modelo e os resultados obtidos.

4.2.1 Verificação do modelo

Para a verificação, o parâmetro de entrada foi a situação atual da academia, com apenas a caldeira. O objetivo da análise foi verificar se os valores declarados para a caldeira atenderiam a totalidade da demanda térmica — chuveiros e piscinas — e, então, comparar as perdas simuladas para a piscina com os valores obtidos no método baseado na ISO/TR 12596. Após, comparou-se esses valores com aqueles obtidos para a situação na qual os coletores fazem parte do sistema. A Figura 8 apresenta o resultado obtido para a energia gerada pela caldeira, ao longo dos meses. De acordo com os resultados do modelo, toda a demanda térmica da academia pôde ser atingida, Figura 9. Os valores obtidos para as perdas térmicas, mensalmente, são apresentados na Figura 10.

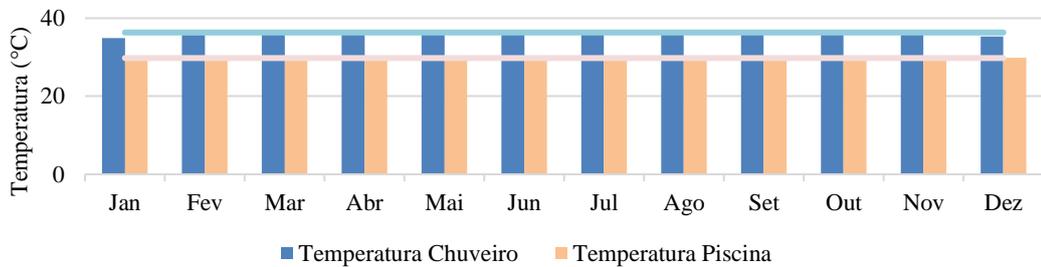
O valor médio encontrado para as perdas foi de 132 GJ, valor superior ao obtido analiticamente em cerca de 11%. Uma possível razão para a diferença é a inclusão de perdas por condução (*Transmission losses*) no modelo, valor que corresponde a 3% da totalidade.

Figura 8 – Energia total gerada pela caldeira



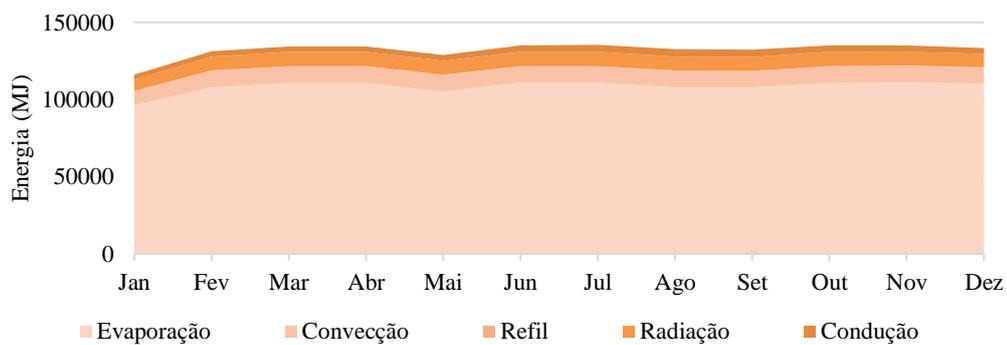
Fonte: Autor

Figura 9 – Temperatura (°C) da piscina (em laranja) e dos chuveiros (em azul)



Fonte: Autor

Figura 10 – Valores obtidos para as perdas da piscina, em MJ

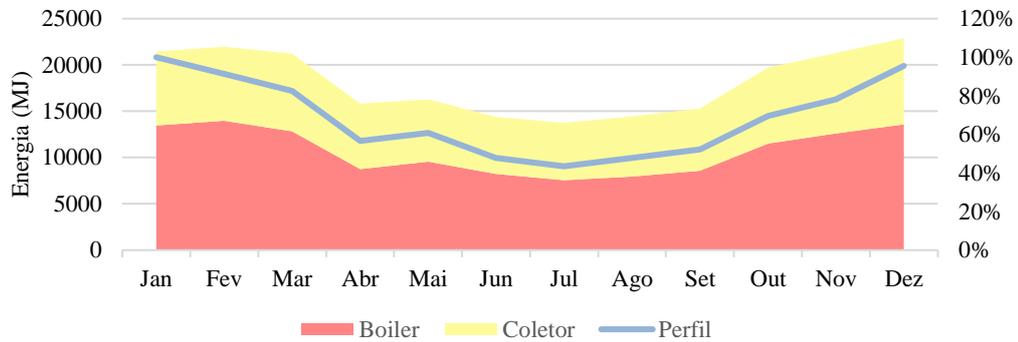


Fonte: Autor

4.2.2 Resultados do modelo

De forma a manter as condições de aquecimento – temperatura do chuveiro e da piscina – foram simuladas diversas configurações de sistema que variavam a potência da caldeira. Foi obtido um valor mínimo de 140 kW, uma redução de aproximadamente 60%, para manter o aquecimento. Com esta configuração, foi analisada a demanda térmica dos chuveiros, Figura 11.

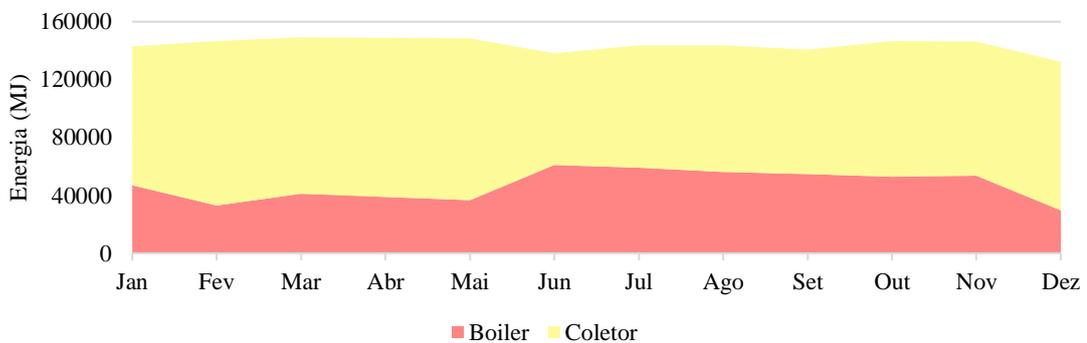
Figura 11 – Energia entregue à água dos chuveiros pelos coletores (amarelo) e pela caldeira (laranja)



Fonte: Autor

Percebe-se que, em média, 41% de toda a energia direcionada ao aquecimento dos chuveiros pode ser gerada pelos coletores. É notável, também, a diminuição da demanda por energia nos meses de inverno, esta diminuição se dá pelo menor público frequentando a academia neste período, conforme é observado através da linha denominada Perfil (azul). A mesma situação, para as piscinas, é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Energia provida à piscina

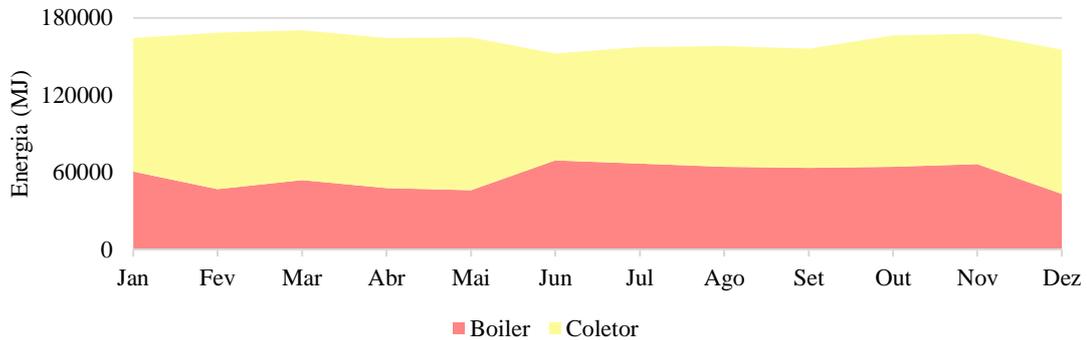


Fonte: Autor

Nota-se que cerca de 67% do aquecimento é provido pelos coletores. Nos meses de inverno, devido à menor irradiação, há um aumento na energia oriunda da caldeira. Por fim, o total de energia provido pelo sistema caldeira e coletores, é demonstrado na Figura 13.

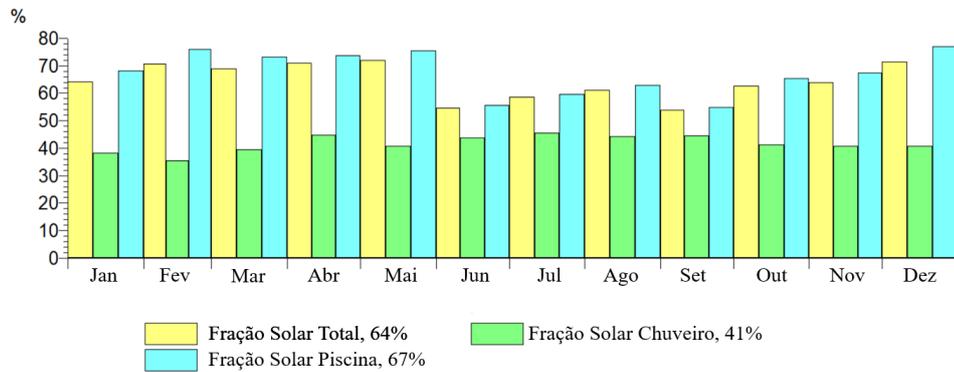
Analisando-se o sistema completo, cerca de 88% da energia total é destinada ao aquecimento da piscina, enquanto apenas 12% é destinado aos chuveiros. Os coletores fornecem em torno de 64% da energia total, Figura 14

Figura 13 – Energia provida ao sistema



Fonte: Autor

Figura 14 – Fração solar obtida para os sistemas

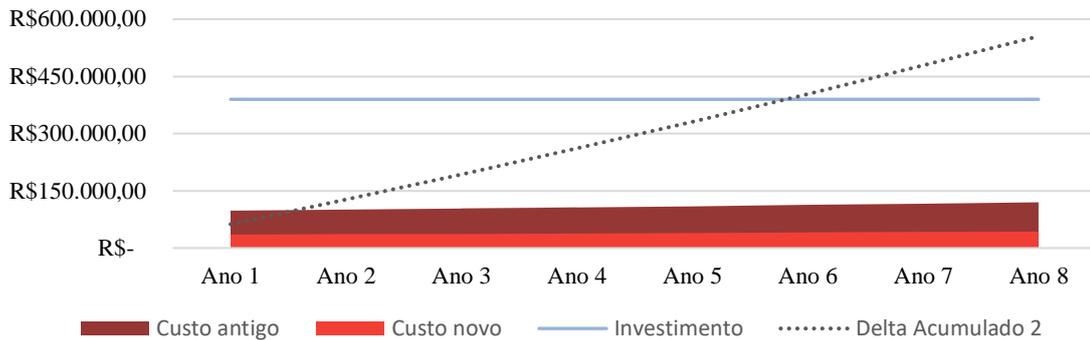


Fonte: T*SOL, 2021

4.3 Análise financeira

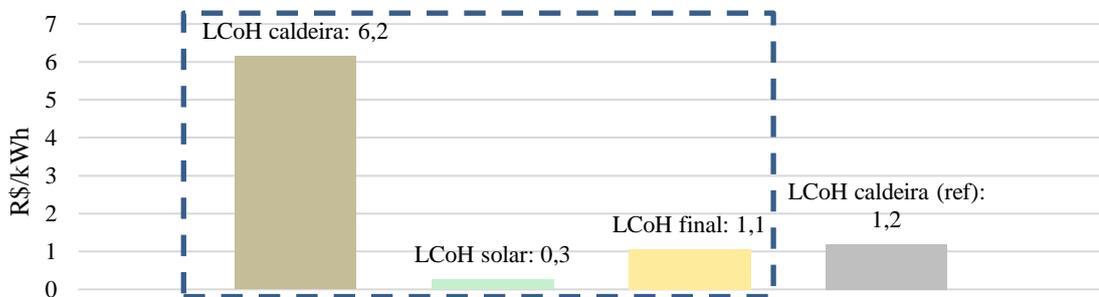
Como primeiro item da análise financeira, foi realizada a comparação entre a economia obtida pela substituição de parte da geração da caldeira pelos coletores solares, com investimento inicial estimado em R\$ 390.000,00, no qual R\$ 300.000,00 são referentes a aquisição dos coletores, com base em pesquisa de mercado, e o restante do valor, 30% da aquisição, é destinado a instalação e mão de obra para tal. Além do investimento inicial, foi considerado o gasto com combustível, proporcional à diminuição de energia obtida na caldeira. Custos relacionados aos combustíveis foram reajustados em 3% ao ano, estimando a inflação. Conforme demonstrado na Figura 15, em aproximadamente 6 anos o valor economizado já se iguala ao investimento.

Por fim, foi realizada a análise econômica utilizando a metodologia LCoH, na qual além de considerar o investimento inicial e custos com combustível, foi estimado o custo com funcionários em R\$ 4.000,00 ao mês, que também foi reajustado com base no índice de 3% ao ano. A simulação encontra-se explicitada na Figura 16, onde o retângulo pontilhado delimita a área após a instalação dos coletores, considerando o uso remanescente da caldeira, coletores e ponderado final.

Figura 15 – Comparação entre custos, *payback* simples

Fonte: Autor

Figura 16 – Valores obtidos no método LCoH



Fonte: LCoH Tool, 2006

Comparando os valores finais obtidos para o período de 20 anos, de 1,1 R\$/kWh para o conjunto solar-caldeira e 1,2 R\$/kWh para o uso exclusivo da caldeira, nota-se que o valor do conjunto é cerca de 8% menor que a referência.

5 CONCLUSÃO

Este artigo teve como objetivo principal dimensionar um sistema de aquecimento solar de água para duas piscinas e um conjunto de chuveiros em uma academia. Concomitantemente foi analisada a viabilidade energética, estrutural e financeira do projeto. A caldeira, fonte auxiliar, já existente foi mantida. Porém, devido ao SAS, foi minimamente requisitada.

Utilizando toda a área disponível no local, chegou-se a um total de 400 coletores, que juntos supririam cerca de 67% da energia mensal necessária à piscina e 41% da energia mensal necessária aos chuveiros. Totalizando, assim, 64% de toda a demanda energética. O investimento necessário, juntamente com a redução do uso da caldeira, levou o projeto a um *payback* de aproximadamente 6 anos, e um LCoH 8% menor em relação àquele associado ao uso exclusivo da caldeira. Também foi obtida a relação de perdas na piscina, sendo que cerca de 82% decorre apenas da perda por evaporação. Comparando-se as perdas da piscina obtidas no T*SOL com as obtidas no método da ISO/TR 12596, chegou-se a uma diferença de 11%.

Assim, o presente artigo conclui que, para uma área de 400 m² de coletores, na cidade de Porto Alegre, RS, com base nas condições simuladas, o uso da caldeira poderia ser reduzido em cerca de 64% com um investimento total de R\$ 390.000,00.

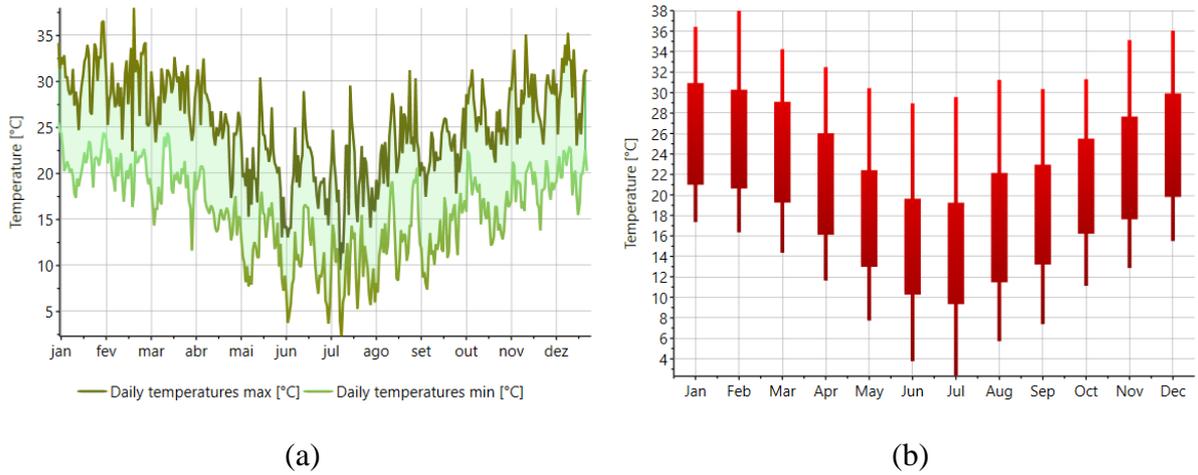
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEA. **Standards and Guidelines**. 2020. Disponível em: <https://aeawave.org/>.
- ALMANZA, Rafael; LARA, Javier. Energy requirements for a swimming pool through a water-atmosphere energy balance. **Solar Energy**, [S.L.], v. 53, n. 1, p. 37-39, jul. 1994. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0038-092x\(94\)90602-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0038-092x(94)90602-5).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO/TR 12596**: Solar heating Swimming-pool heating systems: Dimensions, design and installation guidelines, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações, 2019.
- BELINAZO, Márcia Lorensi; BELINAZO, Hélio João. Parâmetros do aquecimento de água em chuveiros: conforto e energia. **Vidya**, Santa Maria, v. 24, n. 41, p. 164-182, jun. 2004. Disponível em: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/VIDYA/article/view/428>.
- BORGES, Camilla de Barros. **Temperatura ideal para o banho**. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/ebserh/pt-br/hospitais-universitarios/regiao-centro-oeste/hc-ufg/comunicacao/noticias/qual-e-a-temperatura-ideal-para-o-banho>. Acesso em: 28 nov. 2022.
- CHOW, T.T.; BAI, Y.; FONG, K.F.; LIN, Z.. Analysis of a solar assisted heat pump system for indoor swimming pool water and space heating. **Applied Energy**, [S.L.], v. 100, p. 309-317, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.058>.
- FINA. **World Aquatics Constitution**. 2023. Disponível em: <https://www.fina.org/rules>. Acesso em: 2 jan. 2023.
- GONÇALVES, R.s.; PALMERO-MARRERO, Ana I.; OLIVEIRA, Armando C.. Analysis of swimming pool solar heating using the utilizability method. **Energy Reports**, [S.L.], v. 6, p. 717-724, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.055>.
- HAHNE, E.; KÜBLER, R.. Monitoring and simulation of the thermal performance of solar heated outdoor swimming pools. **Solar Energy**, [S.L.], v. 53, n. 1, p. 9-19, jul. 1994. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0038-092x\(94\)90598-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0038-092x(94)90598-3).
- KALOGIROU, Soteris. Análise econômica da energia solar. In: KALOGIROU, Soteris. **Engenharia de energia solar: processos e sistemas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. Cap. 12, p. 1123.
- LUGO, S.; MORALES, L.I.; BEST, R.; GÓMEZ, V.H.; GARCÍA-VALLADARES, O.. Numerical simulation and experimental validation of an outdoor-swimming-pool solar heating system in warm climates. **Solar Energy**, [S.L.], v. 189, p. 45-56, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.041>.
- METEONORM, 2023. **Meteonorm Software**. Disponível em: <https://meteonorm.com/en/>. Acesso em 11/03/2023.
- SHC. **Price Reduction of Solar Thermal Systems**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://task54.iea-shc.org>. Acesso em: 5 jul. 2022.
- SHORT, Walter; PACKY, Daniel J.; HOLT, Thomas. Economic Measures: simple payback period. In: SHORT, Walter; PACKY, Daniel J.; HOLT, Thomas. **A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies**. Colorado: Nrel, 1995. Cap. 4, p. 56.
- SMITH, Charles C.; LÖF, George; JONES, Randy. Measurement and analysis of evaporation from an inactive outdoor swimming pool. **Solar Energy**, [S.L.], v. 53, n. 1, p. 3-7, jul. 1994. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0038-092x\(94\)90597-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0038-092x(94)90597-5).
- T*SOL, 2023. Valentin Software: **T*SOL** - 30-day trial version. Disponível em: <https://valentin-software.com/en/downloads/>. Acesso em 15/08/2022.
- ZUCCARI, F; A SANTIANGELI; ORECCHINI, F. Energy analysis of swimming pools for sports activities: cost effective solutions for efficiency improvement. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 126, p. 123-130, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.131>.

ANEXO A – DADOS CLIMÁTICOS PARA PORTO ALEGRE

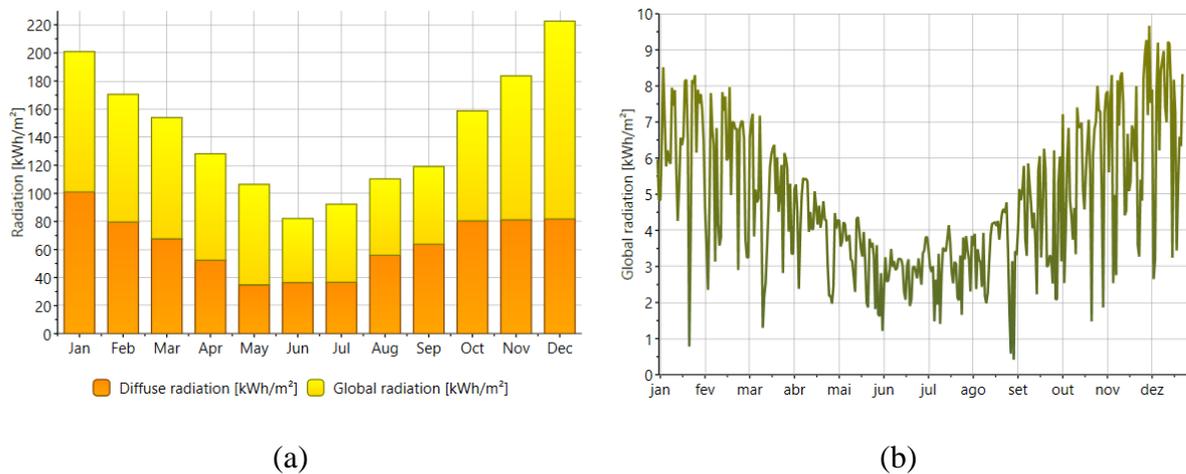
Os dados climáticos utilizados no modelo simulado foram obtidos através do Meteonorm (METEONORM, 2023). As figuras a seguir ilustram os valores utilizados para a cidade de Porto Alegre.

Figura A.1 – (a) Variação da temperatura máxima e mínima diária ao longo do ano e (b) faixa de temperatura média.



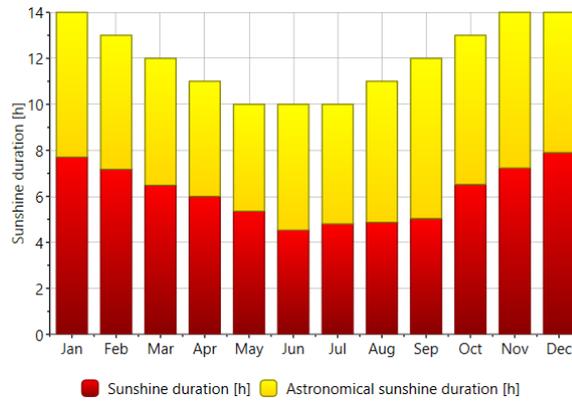
Fonte: METEONORM, 2023

Figura A.2 – (a) Radiação difusa (laranja) e radiação global (amarelo) ao longo dos meses e (b) radiação global diária.



Fonte: METEONORM, 2023

Figura A.3 – Duração da luz solar média mensal e duração da luz solar média mensal astronômica.



Fonte: METEONORM, 2023