

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA MECÂNICA**

LUIZ VEANHOLI NETO

**ANÁLISE DE UM COLETOR SOLAR PARA
PISCINA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

Dourados
2018

LUIZ VEANHOLI NETO

**ANÁLISE DE UM COLETOR SOLAR PARA
PISCINA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal da Grande Dourados, como parte do requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Dr. Reginaldo Ribeiro de Sousa
Orientador

Dourados
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

V395a Veanholi Neto, Luiz

ANÁLISE DE UM COLETOR SOLAR PARA PISCINA ATRAVÉS DE
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL / Luiz Veanholi Neto -- Dourados: UFGD,
2018.

78f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Reginaldo Ribeiro de Sousa

TCC (Graduação em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal da
Grande Dourados

Inclui bibliografia

1. Energia Solar. 2. Placas Coletoras. 3. Simulação Computacional. 4.
Eficiência do Aquecimento. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

LUIZ VEANHOLI NETO

ANÁLISE DE UM COLETOR SOLAR PARA PISCINA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal da Grande Dourados, como parte do requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em ____ de ____ de 20____.

Professor Dr. Reginaldo Ribeiro de Sousa - Orientador
Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

Professor Dr. Fernando Augusto Alves Mendes - Membro Examinador
Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

Professor MSc. Gustavo Aparecido Pita Baggio - Membro Examinador
Centro Universitário da Grande Dourados - UNIGRAN

Dourados – MS
2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nada teria sido possível, por me colocar em situações difíceis, mas essenciais para meu crescimento, e ao mesmo tempo me dar sabedoria e força, e me apresentar às pessoas certas para que o fardo não fique nunca pesado demais para carregar.

Agradeço a minha família, principalmente a meus pais, Luiz Carlos e Ivete, e meus irmãos, Vinícius e Francielle e a minha namorada, Ana Carla, por todo amor, apoio e por sempre me incentivarem e apoiarem na realização deste trabalho e em tantas outras coisas. E também aos meus amigos, que tornaram a trajetória muito mais divertida.

Ao meu orientador, Dr. Reginaldo Ribeiro de Souza, pelos conhecimentos à mim transmitidos e pela ajuda na realização deste trabalho, e a todos os professores que de alguma forma contribuíram com a busca e a transmissão do conhecimento.

A empresa Ansys, pela licença acadêmica do seu software Fluent, utilizado durante o trabalho.

E a UFGD, pelo espaço e instrumentos concedidos para a realização da minha jornada acadêmica.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

RESUMO

O aproveitamento da radiação solar, na forma de energia térmica, pode ser utilizado no aquecimento da água e em outras atividades. Um sistema de aquecimento solar é composto por coletores solares, reservatório térmico, circuito hidráulico e ainda pode ter uma fonte de energia auxiliar. O presente trabalho aborda a utilização de energia limpa com a montagem de um sistema para aquecimento de água para piscina, a mesma localizada na cidade de Dourados, na região centro-sul de Mato Grosso do Sul, com o objetivo de analisar o comportamento da água no interior da placa coletora, com observância a sua temperatura, pressão, sua velocidade e sua perda de carga. Primeiramente, fez-se as análises catalográficas dos fabricantes de coletores solares, estimando assim a quantidade de 19 placas coletoras e a vazão de 4500 litros por hora para o sistema, após essas informações montou-se e simulou essas condições no software ANSYS FLUENT para buscar o comportamento do fluido no aquecimento da piscina. Após isso, comparou-se os resultados com o dos fabricantes, o que levou a medição no aumento da temperatura de até 0,3 K por coletor solar, suficiente para o aquecimento da piscina e a perda de carga insignificante na tubulação dos coletores. Ao final, constatou-se possíveis formas de melhorar esse sistema futuramente.

Palavras-chave: Energia Solar, Placas Coletoras, Simulação Computacional, Eficiência do Aquecimento

ABSTRACT

This work deals with the use of clean solar energy for a water heating system for a specific swimming pool, located in the city of Dourados, in the South-central region of Mato Grosso do Sul state, with the objective of analyzing the behavior of water: observing its temperature, pressure, velocity and pressure drop. Firstly, the catalytic analyzes of the solar collector manufacturers were done, estimating the quantity of 19 collector plates and the flow rate of 4500 liters per hour for the system. After this information was assembled, the conditions were simulated in the software ANSYS FLUENT to search the behavior of the fluid during the pool-heating process. Afterwards, it compared the results with those of the manufacturers, resulting in a temperature increase of up to 0.3 K per solar collector, being sufficient for the heating of the pool and the insignificant loss of charge in the pipe of the collectors. By the end, it was verified possible forms to improve this system in the future.

Key words: Solar energy, Solar panels, Computing simulations, Heating Efficiency

LISTA DE FIGURAS

1	Sistema de aquecimento solar por termofissão.	24
2	Sistema de aquecimento solar por bombeamento.	24
3	Coletores solares em paralelo.	25
4	Coletores solares em série.	25
5	Água fria se deslocando para os coletores solares.	28
6	Radiação solar esquentando a água.	28
7	Água quente retorna para a piscina.	29
8	a) Coletor Solar Fechado e b) Aberto.	30
9	Coletor Solar Industrial.	30
10	Coletor Solar de Vácuo.	31
11	Coletor Solar Descartável.	32
12	Gráfico de Moody.	35
13	Gráfico de Moody para escoamento totalmente turbulento.	35
14	Coefficiente de perda de carga de alguns acessórios.	36
15	Esquema básico do sistema.	42
16	Esquema de interligação hidráulica de um sistema típico.	43
17	Módulo.	44
18	Painel.	45
19	Bateria.	45
20	Especificação Técnica do Coletor Solar ACF.	46
21	Variações de áreas recomendadas em diferentes locais e ambientes.	48
22	Compensação de área.	48
23	Baterias ligadas em série.	50
24	Baterias ligadas em série e paralelo.	51
25	9 Coletores em série na primeira bateria e 10 na segunda.	51
26	Relação dos diâmetros dos tubo pela vazão.	52
27	Bateria simples.	53
28	Baterias ligadas em série na horizontal.	53
29	Baterias ligadas em série na vertical.	54
30	Baterias ligadas em paralelo na horizontal.	54
31	Baterias ligadas em paralelo na vertical.	55
32	Piscina com capa térmica.	56
33	Geometria do coletor solar.	57
34	Malha completa.	58
35	Malha da tubulação.	58
36	Refino da malha em pontos críticos.	59

37	Modelo de turbulência adotado.	59
38	Métodos de segunda ordem.	60
39	Velocidade de entrada.	61
40	Temperatura de entrada.	61
41	Pressão de saída.	62
42	Temperatura ambiente.	62
43	Fluxo de calor.	63
44	Rugosidade do material.	63
45	Número de interações.	64
46	Gráfico residual - convergência.	65
47	Temperatura ao longo do coletor solar.	68
48	Temperatura nos tubos coletores.	68
49	Pressão ao longo do coletor solar.	69
50	Pressão nos tubos coletores.	69
51	Velocidade no coletor solar.	70
52	Linhas de velocidade no coletor solar.	70
53	Velocidade na entrada nos tubos coletores.	71
54	Linhas de velocidade na entrada nos tubos coletores.	71
55	Velocidade na saída nos tubos coletores.	72
56	Linhas de velocidade na saída nos tubos coletores.	72
57	Velocidade nos tubos coletores.	73
58	Relação de tubo e velocidade.	74

LISTA DE TABELAS

1	Dados de entrada para os cálculos das placas.	47
2	Dados de entrada para a geometria.	57
3	Relação de tubo por velocidade.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

CFD Fluidodinâmica Computacional

FDM Diferenças Finitas

FEM Elementos Finitos

FVM Método dos Volumes Finitos

HPC Computador de Alta Performance

INMETRO Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

PET Polietileno tereftalato

UV Ultra Violeta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVOS	26
1.1.1	Objetivo geral	26
1.1.2	Objetivos específicos	26
1.2	MOTIVAÇÃO	26
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	Energia Solar	27
2.1.1	Radiação	27
2.1.2	Energia Solar Térmica	27
2.2	Aquecedor Solar para Piscina	27
2.3	Tipos de Coletores Solares	29
2.3.1	Coletor Solar Plano Convencional	29
2.3.2	Coletor Solar Convencional Industrial	30
2.3.3	Coletor Solar de Tubos de Vácuo	31
2.3.4	Coletor Solar com Materiais Recicláveis	31
2.4	Classificação do escoamento	32
2.5	Perda de Carga	33
2.5.1	Perda de Carga Distribuída	33
2.5.2	Perda de Carga Localizada	35
2.6	Simulação Computacional	36
2.6.1	Etapas Principais de uma Simulação	37
2.6.1.1	Pré-Processador	37
2.6.1.2	Solver	37
2.6.1.3	Pós-Processamento	38
2.6.2	Ansys Fluent	38
3	METODOLOGIA	41
3.1	Análise Catalográfica	41
3.1.1	Introdução	41
3.1.2	Funcionamento	41
3.1.3	Composição e Vantagens	43
3.1.3.1	Composição	43
3.1.3.2	Vantagens	43
3.1.4	Módulos, Painéis e Baterias	44
3.1.5	Características Técnicas	45

3.1.6	Dimensionamento	46
3.1.6.1	1º passo: Escolhendo o melhor modelo de coletor	47
3.1.6.2	2º passo: Consulta da tabela de área	47
3.1.6.3	3º passo: Número de coletores	49
3.1.6.4	Definição do Local da Instalação dos Coletores	49
3.1.6.5	4º passo: Vazão	50
3.1.6.6	5º passo: Tubulação correta	52
3.1.6.7	6º passo: Bomba	52
3.1.7	Instalação Hidráulica	52
3.1.8	Detalhes da Tubulação- Entrada e Saída de Água	56
3.1.9	Capa Térmica	56
3.2	Análise Computacional	56
3.2.1	Geometria do projeto	57
3.2.2	Malha	58
3.2.3	Modelo de turbulência	59
3.2.4	Condições de contorno	60
3.2.5	Simulação	63
3.2.6	Pós-Processamento	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1	Simulações realizadas	67
4.1.1	Temperatura	67
4.1.2	Pressão	68
4.1.3	Velocidade	69
4.1.4	Perda de Carga	73
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS	75
6	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A energia solar, segundo Barbosa (2012), é uma fonte de energia limpa, renovável e sem custo para ser produzida, não gera resíduo e não polui, podendo resolver problemas no mundo, bem como evitar a construção de barragens, represas e hidroelétricas, contribuindo com a diminuição de alagamentos de terras produtivas que poderiam ser utilizadas para agropecuária e agricultura e estar sendo ocupadas por famílias.

Como o ser humano vive sempre em busca de melhores soluções para garantir o seu bem-estar, a energia solar está surgindo como uma fonte de energia barata e ilimitada que está começando a ser mais explorada nos dias atuais, principalmente pelo fato da energia convencional, que utiliza combustíveis fósseis para a produção, como gasolina e diesel, estar se tornando muito cara e dependendo de fatores que afetam o nosso ambiente de maneira prejudicial, como liberando gases que aumentam o efeito estufa e na poluição de oceanos quando acontece algum desastre ecológico.

Uma das formas de resolver esse problema, está sendo a utilização do sol como fonte de energia, que apresenta boas perspectivas futuras, visando tanto a sustentabilidade quando a redução de gastos com energia.

Existem duas formas de aproveitamento dessa fonte, que são: a energia solar fotovoltaica e a térmica. Na energia fotovoltaica tem a transformação da radiação solar em energia elétrica, pois cria-se uma corrente elétrica pela radiação solar em materiais semicondutores. Por outro lado, a energia solar térmica consiste no aquecimento de água ou outros fluidos pela radiação solar.

Focaremos o nosso trabalho no segundo caso descrito, pois a energia fotovoltaica é ainda muito cara comparado com a energia térmica, pois suas células solares e demais componentes ainda tem o preço elevado.

A utilização da energia solar térmica é um processo simples, que começa através de um reservatório de água que transfere água fria para um coletor solar, que é o dispositivo responsável pela captação da energia do sol e sua conversão em calor utilizável (CARDOSO, 2008), a captação dessa radiação se dá por uma base de placas metálicas que recebem, na maioria das vezes, uma pintura preta para elevar sua capacidade de absorção da luz. A água aquecida no coletor solar é transferida para o reservatório, o qual é feito de material termicamente isolante para evitar a perda de calor da água até o seu uso.

A circulação de água no sistema pode ser de duas formas: Termofissão, que é um processo natural que ocorre por causa da diferença de densidade da água quente e fria, e por bombeamento, que é um processo forçado, onde normalmente é feito em sistemas de grande porte, como piscinas, e como ela se localiza abaixo do nível dos coletores, o sistema

natural (Termofissão) não funcionaria pelo fato de precisar de uma bomba para mandar a água até os coletores. Nas figuras abaixo, pode ser visto o funcionamento de um coletor solar através de termofissão e bombeamento.

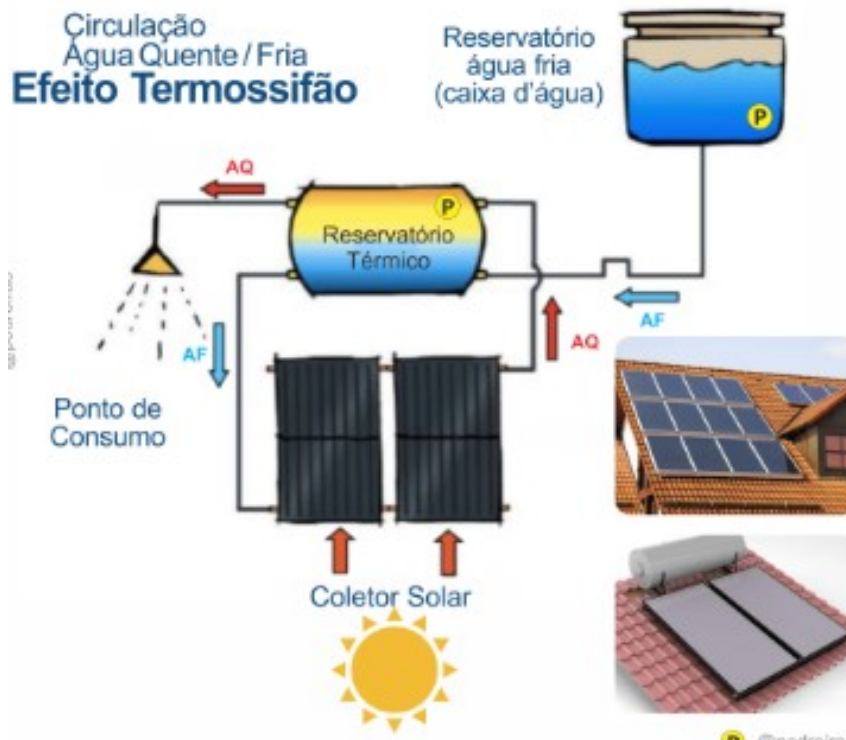


Figura 1 – Sistema de aquecimento solar por termofissão.

Fonte – pedreira.com.br.

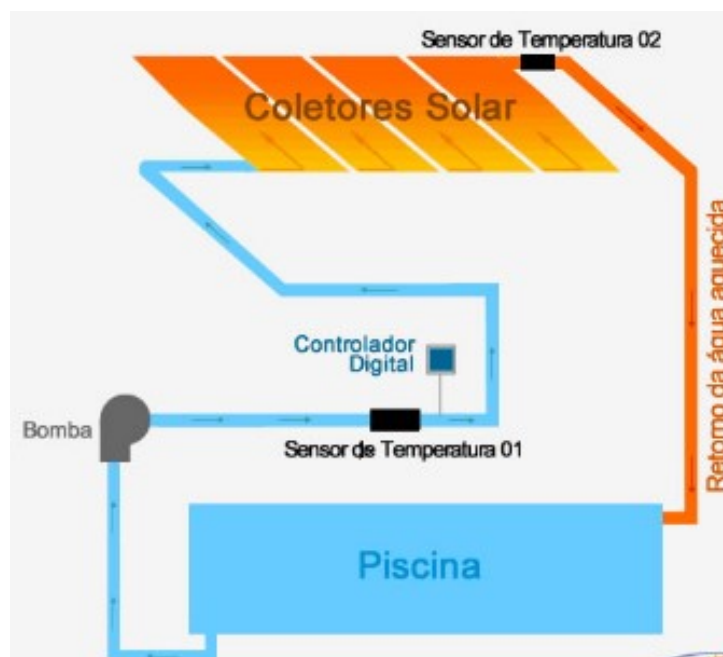


Figura 2 – Sistema de aquecimento solar por bombeamento.

Fonte – quartsol.com.br.

Para o aquecimento das piscinas, os coletores solares têm duas disposições com funções diferentes: Em série, onde a temperatura final da água será maior, pois a água primeiro passa por um coletor inteiro, e só depois passa para o outro, ou em paralelo, onde a vazão é maior, pois a área coletora influente é maior, como denotado na equação (3.3). As nomenclaturas e definições dos arranjos dos coletores estão explicadas na seção 3.1.4 da metodologia. As ilustrações abaixo mostram as diferenças de arranjo dos coletores.



Figura 3 – Coletores solares em paralelo.

Fonte – heliotek.com.br.



Figura 4 – Coletores solares em série.

Fonte – heliotek.com.br.

O presente trabalho tem como função analisar o escoamento do fluido hidrodinâmico em relação a pressão, temperatura, velocidade e a perda de carga nos coletores solares.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar os parâmetros de velocidade, pressão e temperatura no coletores solar, e a perda de carga no mesmo, através de simulação numérica utilizando o software ANSYS FLUENT, e após isso, comparar o resultado com o do catálogo do fabricante.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Analisar o catálogo do fabricante;
- b) Construir um modelo numérico do coletor solar no software ANSYS FLUENT;
- c) Comparar esses resultados obtidos com o do catálogo;
- d) Analisar os possíveis efeitos da perda de carga na tubulação dos coletores.

1.2 MOTIVAÇÃO

A radiação solar é renovável e abundante em nosso país, utilizando a energia térmica solar pode-se diminuir o consumo de energia elétrica e contribuir para a sustentabilidade do planeta.

Com a melhor eficiência dos coletores solares, podemos ter uma alta taxa de conforto tanto no verão quanto no inverno, e usar a piscina de modo que a temperatura da água sempre se manterá a mesma, e o melhor de tudo, sem gastos com energia.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo, introduz o tema que será abordado e tem os objetivos do trabalho e como o mesmo está dividido.

No segundo capítulo, é feita uma revisão da literatura, abordando os seguintes temas: Transferência de calor, perda de carga e simulações.

No terceiro capítulo, é apresentado a metodologia do trabalho, ou seja, como o trabalho se encaminhará, os passos a passos do mesmo.

No quarto capítulo, será apresentado os resultados e discussões, os valores obtidos com as análises feita no ANSYS FLUENT e a comparação com o valor do fabricante.

Por fim, no quinto capítulo, será apresentado as conclusões do trabalho, o que pode melhorar no projeto, para aumentar sua eficiência e sua transferência de calor, e diminuir sua perda de carga nos tubos coletores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Energia Solar

A energia solar é a principal fonte de energia para o planeta, tanto como fonte de calor, como fonte de luz; sendo indispensável para a existência da vida na Terra, bem como o ponto de partida para os processos químicos e biológicos (SAMPAIO, 2009).

A energia solar por meio de diferentes tecnologias pode ser aproveitada, como para energia solar fotovoltaica, energia solar heliotérmica, para aquecimento térmico (que é o foco desse trabalho) e estratégias de arquitetura solar.

2.1.1 Radiação

É o mecanismo de transmissão de calor entre dois corpos a temperaturas diferentes, e não necessita de um suporte físico. É a forma de transferência de calor entre o sol e a Terra. Para a física, radiação trata-se da energia ondulatória ou das partículas materiais que se propagam através do espaço (MARTINS et al., 2014).

2.1.2 Energia Solar Térmica

É uma forma de energia alternativa, e uma tecnologia, aproveitada para gerar energia térmica ou energia elétrica, para uso em residências ou indústrias. Tecnologias essas que nos permitem a conversão de energia solar em térmica com desenvolvimentos distintos em função da gama de temperaturas necessárias. Como exemplo há o aquecimento de piscinas, água para banho, aquecimento de ambientes e aquecimento para processos industriais (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

2.2 Aquecedor Solar para Piscina

É formado por um conjunto de placas coletoras que absorvem o calor do sol e aquecem a água. Durante todo o período em que a temperatura da água não coincide com a temperatura desejada a água da piscina circula pelos coletores, com o uso da bomba de circulação e é aquecida gradualmente. O aquecedor solar para piscinas é o equipamento que capta a energia solar, transformando-a em energia térmica e transferindo o calor para a água da piscina, maximizando a utilização da piscina. Uma solução mais econômica para o aquecimento de piscinas.

As ilustrações abaixo representam o processo descrito anteriormente, na Figura 5 a água mais fria sai da piscina impulsionada pela bomba e sobe para os coletores solares, representado na Figura 6, que recebem a radiação solar e esquentam a água, e na Figura 7 a água quente retorna para a piscina para tornar o ambiente agradável.



Figura 5 – Água fria se deslocando para os coletores solares.

Fonte – heliotek.com.br.

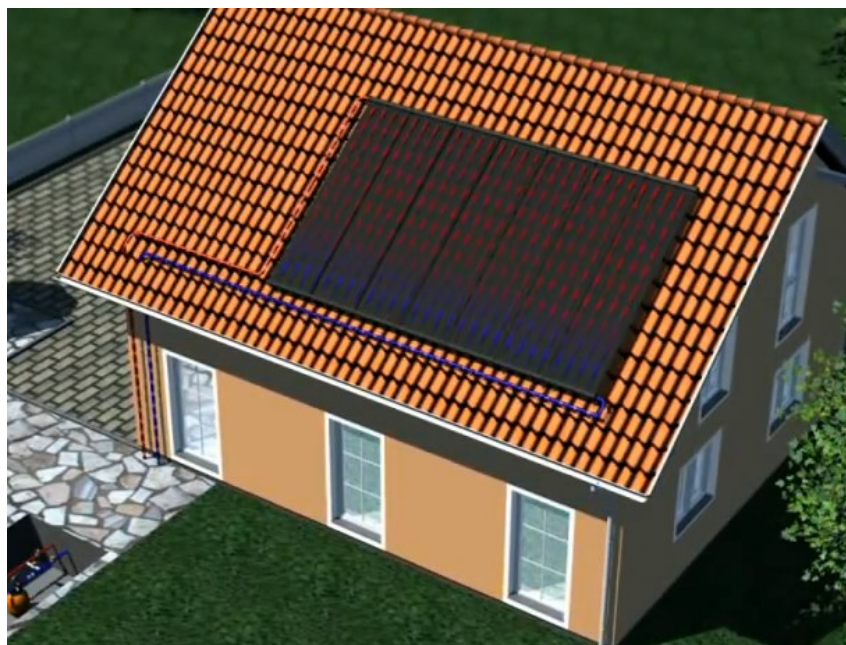


Figura 6 – Radiação solar esquentando a água.

Fonte – heliotek.com.br.

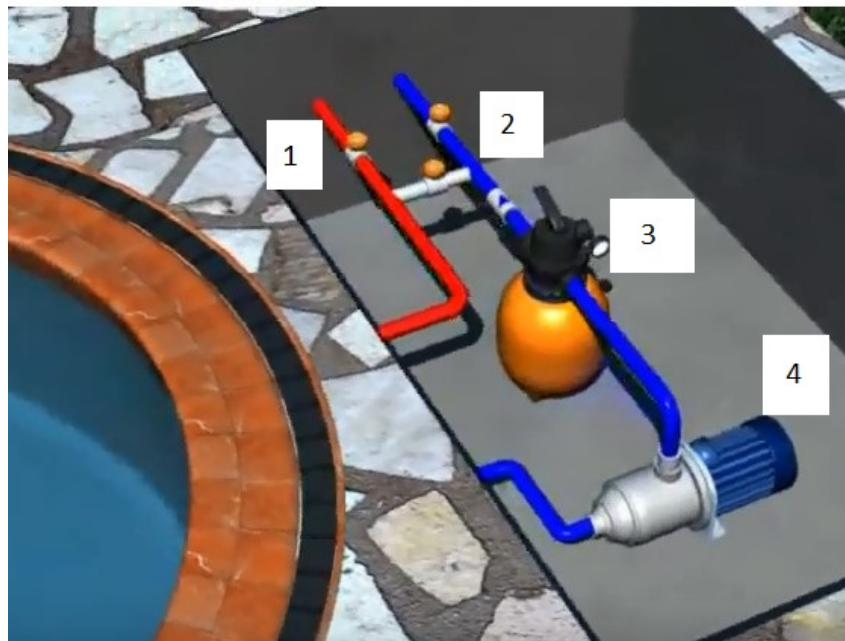


Figura 7 – Água quente retorna para a piscina.

Fonte – heliotek.com.br.

Onde:

- 1 - Tubulação com água aquecida retornando para a piscina
- 2 - Tubulação com água fria indo para os coletores
- 3 - Filtro
- 4 - Bomba

2.3 Tipos de Coletores Solares

2.3.1 Coletor Solar Plano Convencional

O coletor solar é o componente mais importante do sistema de aquecimento solar, pois é responsável pela conversão da energia solar em energia térmica. Portanto, um dos fatores mais críticos para o bom funcionamento de um sistema é a qualidade dos coletores solares empregados (SOUZA; MIRANDA; SILVA, 2010).

Um coletor solar pode ser dividido em duas partes: absorvedor e gabinete. O absorvedor é responsável pela recepção, conversão e transferência da energia solar para o fluido de trabalho. É geralmente construído de tubos e chapas (conjunto de aletas metálicas pintadas de preto fosco) de material condutor para melhor desempenho do sistema. O material mais empregado na construção é o cobre devido a sua ótima condutividade térmica, resistência à corrosão e facilidade de manuseio. Já o gabinete, tem a função de

isolar o absorvedor do meio ambiente, garantindo que as variações atmosféricas não afetem a conversão de energia solar em energia térmica (SOUZA; MIRANDA; SILVA, 2010).

Segundo Costa (2002), do ponto de vista de fabricação, os painéis planos são considerados equipamento simples, e convertem a radiação solar em calor transferindo esta energia para a água. A placa absorvedora é a própria superfície que recebe radiação. Os coletores solares planos podem ser fechado ou aberto (conforme a Figura 8): os coletores fechados são utilizados para aquecer a água a temperatura em torno de 60°C e os coletores abertos operarem com temperaturas variando entre 28 e 30°C (COSTA, 2002).



Figura 8 – a) Coletor Solar Fechado e b) Aberto.

Fonte – Costa, 2002.

2.3.2 Coletor Solar Convencional Industrial

Os coletores solares convencionais são de materiais nobres, como alumínio e aço inoxidável. Sua alta performance térmica possibilita um aquecimento de água muito mais rápido e melhor eficiência, estão disponíveis em vários tamanhos e são aprovados e etiquetados pelo INMETRO. Segue a Figura 9 de um coletor industrial.

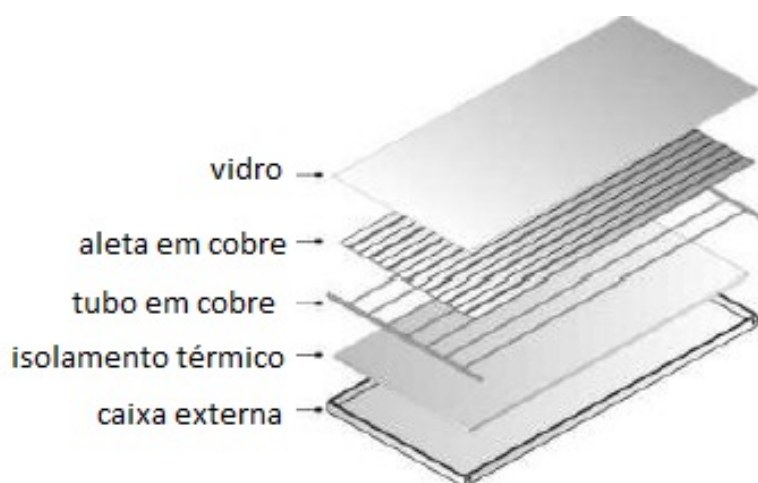


Figura 9 – Coletor Solar Industrial.

Fonte – heliotek.com.br.

2.3.3 Coletor Solar de Tubos de Vácuo

Os coletores solares de tubos a vácuo são coletores solares que, para diminuir as perdas, utilizam vácuo em seu interior (da ordem de 10^{-4} mm Hg), de modo a reduzir a zero suas perdas térmicas e, conseqüentemente, aumentar a temperatura final da água. São compostos por uma série de tubos, cada um com um absorvedor, o que faz com que os raios solares incidam perpendicularmente em suas superfícies durante quase todo o dia, permitindo uma eficiência superior à dos coletores planos. São mais leves, facilitando sua instalação (ENVIRO-FRIENDLY, 2005). São usados para gerar energia térmica para aquecimento de água, pré-aquecimento industrial e refrigeração solar (fonte quente em um ciclo de absorção) (ICAEN, 2003)¹⁶. Segue abaixo o coletor solar de tubos de vácuo representado na Figura 10.



Figura 10 – Coletor Solar de Vácuo.

Fonte – Enviro-Friendly, 2005.

2.3.4 Coletor Solar com Materiais Recicláveis

Este aquecedor utiliza-se garrafas PET e embalagens longa vida Tetrapak, bandejas de poliestireno expandido (Isopor) e sacolas plásticas.

O alto custo inicial dos aquecedores solar de água fez com que José Alcino, morador da cidade de Tubarão, em Santa Catarina, desenvolvesse a partir de garrafas pet, caixas tetrapak, bandejas de isopor e sacolas plásticas, um aquecedor solar alternativo de baixo custo, visando atender às necessidades da população de baixa renda, que não teria condições financeiras de instalar um sistema convencional de aquecimento solar (COIMBRA; AZAMBUJA; DALMAS; COELHO, 2008).

O aquecedor solar de garrafas PET trabalha com a utilização de energia solar da mesma forma que um aquecedor convencional, onde a radiação solar incide nos painéis solares e aquece a água, substituindo a energia elétrica em um chuveiro (ALANO, 2010 apud RAIÁ; SUCHODOLAK; ABREU, 2010).

A Figura 11 representa o aquecedor solar de baixo custo.



Figura 11 – Coletor Solar Descartável.

Fonte – Coimbra; Azambuja; Dalmas; Coelho, 2008.

2.4 Classificação do escoamento

O escoamento no interior de dutos e tubos pode ser laminar ou turbulento.

Para determinar o tipo de escoamento usa-se um número adimensional chamado número Reynolds. Definido abaixo:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.1)$$

Onde:

V=Velocidade média do escoamento

D=Diâmetro interno da tubulação

ρ = Massa específica

μ = Viscosidade Absoluta

Para valores de Reynolds abaixo de 2000 o fluido é laminar. Para Reynolds acima de 4000 o fluido está em regime turbulento. Para valores intermediários, a faixa crítica, precisa-se de uma maior análise.

Em bombas de alimentação de caldeiras, como o fluido é pouco viscoso (água), o escoamento costuma ser turbulento.

2.5 Perda de Carga

Em um sistema real, existem perdas por atrito na superfície da tubulação assim como entre as partículas do fluido, devido a viscosidade do fluido. Assim, como as linhas de corrente não são constantes devido aos acessórios e regime turbulento.

Assim, precisam-se considerar as perdas de carga representada por hf .

Para o estudo da hidráulica de um sistema, usa-se como base o princípio de conservação de energia para fluidos proposto por Bernoulli, que relaciona a energia de pressão, a energia cinética e a energia potencial gravitacional de uma linha de corrente em um escoamento. O teorema de Bernoulli pode ser representado pela equação abaixo juntamente com as perdas de carga:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + hf \quad (2.2)$$

Onde:

V = velocidade do fluido na seção considerada.

g = aceleração gravitacional.

Z = altura estática do fluido.

P = Pressão ao longo da linha de corrente.

ρ = Massa específica do fluido

As perdas de carga podem ser separadas em dois tipos:

- a) Perda de carga distribuída (h_{fn}) que são perdas em trecho reto
- b) Perdas de carga localizada (h_{fl}) que são perdas em acessórios instalados na tubulação

$$hf = h_{fn} + h_{fl} \quad (2.3)$$

2.5.1 Perda de Carga Distribuída

Perdas devido à rugosidade da tubulação que varia de acordo com o material, processo de fabricação da tubulação, conservação e acabamento desta.

A perda de carga distribuída pode ser calculada utilizando a equação de Darcy-Weisbach:

$$hfn = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (2.4)$$

Onde:

f = Coeficiente de atrito

L = Comprimento reto da tubulação

V = velocidade do fluido na seção considerada.

g = aceleração gravitacional.

D = Diâmetro da tubulação

Para determinar o valor do coeficiente de atrito f, precisa-se analisar primeiramente o tipo de escoamento pelo número de Reynolds.

Para escoamento laminares, o fator f será descrito pela fórmula abaixo:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.5)$$

Para o escoamento turbulento, foi usado a equação de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.6)$$

Visto que esta fórmula possui f nos dois lados da equação, deve ser feita de forma iterativa ou usar o Gráfico de Moody mostrado na Figura 12.

Para escoamentos completamente turbulento, o Número de Reynolds não influencia no valor de f, tornando as linhas de rugosidade relativa (ϵ/D) paralelas no gráfico, portanto assim usar a Figura 13.

Formulações teórico-experimentais também surgiram e que facilitam a automatização dos cálculos.

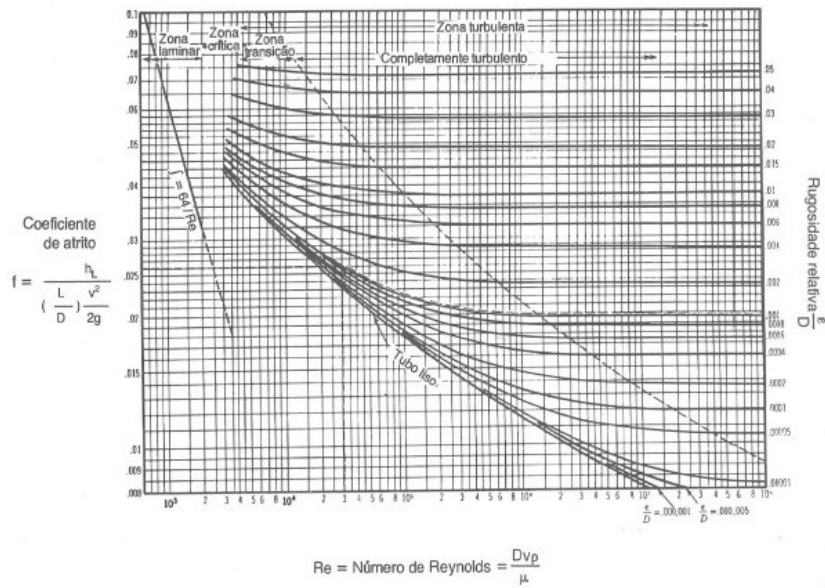


Figura 12 – Gráfico de Moody.

Fonte – Brunetti, 2014.

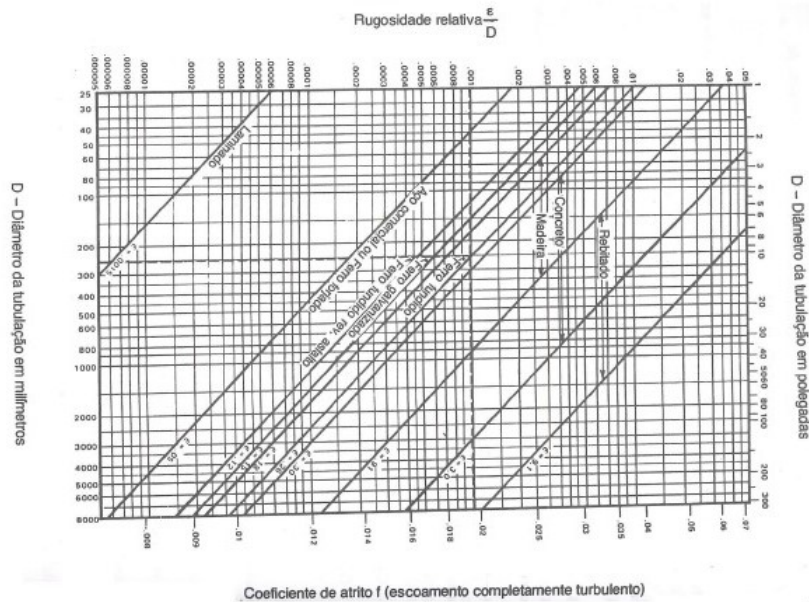


Figura 13 – Gráfico de Moody para escoamento totalmente turbulento.

Fonte – Brunetti, 2014.

2.5.2 Perda de Carga Localizada

A perda de carga localizada é a perda de carga devido aos acessórios como válvulas e curvas. Definida como h_{fl} , a formula abaixo mostra como calcular essa perda, sendo K

tabelado mostrado na Figura 14.

$$hfn = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.7)$$

Onde:

k = Coeficiente de perda

Acessórios	K	Acessórios	K
Cotovelo de 90° raio curto	0,9	Válvula de gaveta aberta	0,2
Cotovelo de 90° raio longo	0,6	Válvula de ângulo aberta	5,0
Cotovelo de 45°	0,4	Válvula de globo aberta	10,0
Curva 90°, r/D=1	0,4	Válvula de pé com crivo	10,0
Curva de 45°	0,2	Válvula de retenção	3,0
Tê, passagem direta	0,9	Curva de retorno, $\alpha = 180^\circ$	2,2
Tê, saída lateral	2,0	Válvula de bóia	6,0

Figura 14 – Coeficiente de perda de carga de alguns acessórios.

Fonte – Oliveira, 2010.

2.6 Simulação Computacional

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD do inglês, Computational Fluid Dynamics) é uma ferramenta que permite analisar e prever sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, como reações químicas, por meio de simulação numérica baseada em computador. Esta ferramenta é usada amplamente em aplicações industriais e não industriais como: aerodinâmica de aeronaves e veículos, usinas energéticas, turbo-máquinas, processos químicos, engenharia biomédica, entre outros (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Segundo Anderson (1995), o CFD é a arte de substituir as integrais ou derivadas parciais (segundo o caso), por equações em formas algébricas discretizadas, que por sua vez são resolvidas para obter valores dos campos de escoamento dos fluidos, em pontos discretos no tempo e/ou espaço.

2.6.1 Etapas Principais de uma Simulação

Para facilitar o acesso ao seu poder de resolução, todos os pacotes de CFD comerciais incluem interfaces de usuário sofisticadas, para inserir os parâmetros do problema e examinar os resultados. Os três elementos principais que todo pacote de CFD contém são: 1) um pré-processador (pre-processor), 2) um solucionador (solver) e 3) um pósprocessador (post-processor) (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

2.6.1.1 Pré-Processador

Na etapa de pré-processamento, na qual a indústria dispende a maior parte do tempo dedicado a CFD, é definida a geometria da região de interesse ou domínio computacional. É gerada a malha desta geometria, onde esta é dividida em formas comuns (chamadas de células), visando facilitar a solução do problema (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

Pode-se criar a geometria desejada nas ferramentas SpaceClaim ou DesignModeler, como também é possível importar outros desenhos de outros softwares, diferentes da Ansys, como o SolidWorks. Já a malha é gerada pela ferramenta Mesh, onde se define a natureza dos objetos e onde se nomeia as partes. Antes de configurar e executar uma simulação de CFD, há um estágio de identificação e formulação do problema em termos dos fenômenos físicos e químicos que precisam ser considerados. Algumas das decisões típicas que podem ser tomadas para modelar um problema de CFD, a fim de reduzir o custo computacional sem perder muita informação do ponto de vista de engenharia, são:

- Modelar o sistema em duas dimensões se for possível;
- Aplicar um plano de simetria ou um plano periódico de rotação para reduzir o número de elementos da malha;
- Excluir os efeitos da temperatura ambiente ou variações de pressão;
- Escolher se irá resolver as equações de turbulência quando necessário;
- Negligenciar os efeitos de pequenas bolhas de ar dissolvidas em água;
- Desconsiderar efeitos magnéticos e da gravidade, entre outros.

No Fluent são especificadas as condições de contorno e definição das propriedades dos fluidos e sólidos envolvidos e toda a parte da solução.

2.6.1.2 Solver

O solver é encarregado de transformar as informações fornecidas no pré-processamento numa linguagem computacional, para resolver as equações pertinentes usando métodos numéricos iterativos. Atualmente há três métodos distintos de solução numérica: diferenças finitas (FDM), elementos finitos (FEM) e método espectrais. O método mais

usado comumente nos códigos comerciais de CFD bem estabelecidos, é o Método dos Volumes Finitos (FVM do inglês, Finite Volume Method), uma formulação especial do FDM (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Em resumo, o método consiste nos seguintes passos:

- Integração das equações governantes do escoamento do fluido sobre todos os volumes de controle (finito) do domínio;
- Discretização ou conversão das equações integrais resultantes em um sistema de equações algébricas e;
- Solução das equações algébricas por um método iterativo.

Uma simulação bem-sucedida é caracterizada por dois aspectos: a convergência da solução e a independência de malha. A convergência de uma solução é monitorada pelos chamados resíduos (medidas da conservação geral das propriedades de fluxo), que devem ser muito pequenos. Por outro lado, a independência de malha é um procedimento sucessivo de refino de uma malha inicialmente grosseira, até que a variação das variáveis de interesse seja mínima ou nula (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

2.6.1.3 Pós-Processamento

No pós-processamento a ferramenta de análise é o CFD Post, onde os resultados são exibidos dependendo da necessidade do programador, que podem ser de diversas formas: numérica, linhas de corrente, campos de temperatura, gráficos, vetores e animações.

Cabe ao engenheiro discernir se os resultados obtidos são suficientemente precisos ou se estão de acordo com a realidade do problema para a aplicação desejada. Geralmente, para validar os resultados obtidos de uma forma significativa, é necessário produzir dados experimentais do sistema real (o que não é sempre possível) ou usar modelos teóricos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

2.6.2 Ansys Fluent

Como pode ser visto em Ansys (2017), o software Ansys Fluent possibilita grande variedade de simulações envolvendo fluidos. Possibilita a modelagem de turbulência, transferência de calor, fluxos multifásicos e interação de fluidos e estruturas. O Fluent, bem como outros produtos, está disponível na plataforma Ansys Workbench, onde é possível também realizar interações entre eles. Esse software utiliza a HPC (Computação de Alta Performance - High Performance Computing) para possibilitar que cálculos complexos sejam resolvidos em pouco tempo.

De acordo com Tramontano (2017), o Fluent é reconhecido por ser capaz de realizar cálculos de maneira rápida e confiável, utilizando variadas formas geométricas para

discretizar o objeto estudado. Devido a todas essas características, o software é utilizado em diversas aplicações e estudos.

Em Latal et al. (2016) é feito um estudo dos efeitos da turbulência mecânica causada por ventiladores em um feixe óptico, utilizando o Fluent para modelar o fluxo de ar. Já Kusaiynov et al. (2016) utilizam o software para realizar uma simulação numérica de um fluxo de ar passando através de uma turbina eólica com pás triangulares do tipo vela. Outro exemplo de uso do Fluent é a simulação computacional da hidrodinâmica de uma caldeira flamo-tubular, realizada por Khaustov et al. (2015).

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho baseou-se nos seguintes passos:

- a) Análise catalográfica do coletor solar;
- b) Simulação computacional no software ANSYS FLUENT;
- c) Análise dos dados obtidos simulados comparando com os do catálogo.

3.1 Análise Catalográfica

O catálogo utilizado para o experimental foi de Aquecedores Solares da ACF Industria, SOLETROL e da KOMECO disponível para consulta livre no site da empresa, e nas referências.

3.1.1 Introdução

É um sistema de aquecimento solar de água voltado especificamente para o uso em piscinas.

As piscinas além de geralmente conterem vários tipos de produtos químicos para manutenção da água, também possuem grandes volumes de água que devem ter temperaturas adequadas a seu uso.

- Piscinas privadas (residenciais) e públicas (clubes e academias), usam-se temperaturas entre 28 e 30°C; - Piscinas para prática de atividades físicas e esportivas (competições), usam-se temperatura de 26,5°C; - Piscinas para tratamentos medicinais (fisioterapia), usam-se a temperatura da água entre 33 e 35°C.

O sistema é composto por placas coletoras dispostas no telhado da residência e uma bomba de recirculação que desloca a água até os coletores, para que seja aquecida e retorne à piscina.

3.1.2 Funcionamento

Os sistemas de aquecimento solar, podem ser montados tanto no solo, com uma proteção sob os painéis, quanto em telhados. Se uma mudança de ângulo for necessária, um suporte pode ser construído.

A Figura 15 mostra um sistema típico instalado no telhado, onde podemos notar três componentes básicos:

1. Coletores solares;

2. Bomba hidráulica do sistema de aquecimento;
3. Tubulação de alimentação e retorno dos coletores.

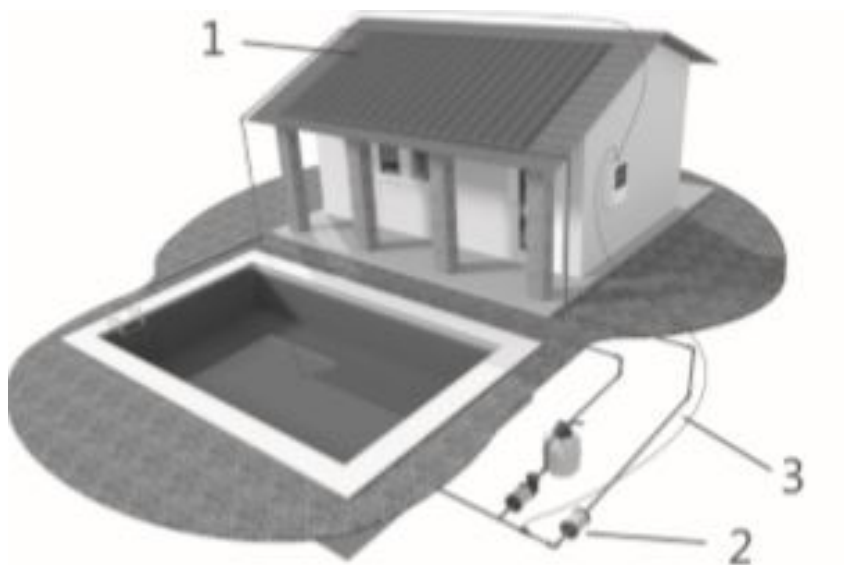


Figura 15 – Esquema básico do sistema.

Fonte – soletrol.com.br.

O princípio de funcionamento é da seguinte forma: Um controlador eletrônico aciona a bomba do sistema sempre que houver energia solar suficiente, ou seja, energia para transferir para os coletores solares e esquentá-los. A piscina continua ser aquecida até que não haja mais energia solar suficiente ou que se tenha atingido a temperatura máxima programada na piscina. A instalação de uma bomba separada para o sistema de aquecimento, permite que a filtragem e o aquecimento aconteçam em momentos diferentes. A Figura 16 mostra um esquema típico de instalação. Quando se deseja aquecimento o ano todo, independente das condições climáticas, é importante instalar um aquecedor auxiliar, normalmente elétrico ou a gás.

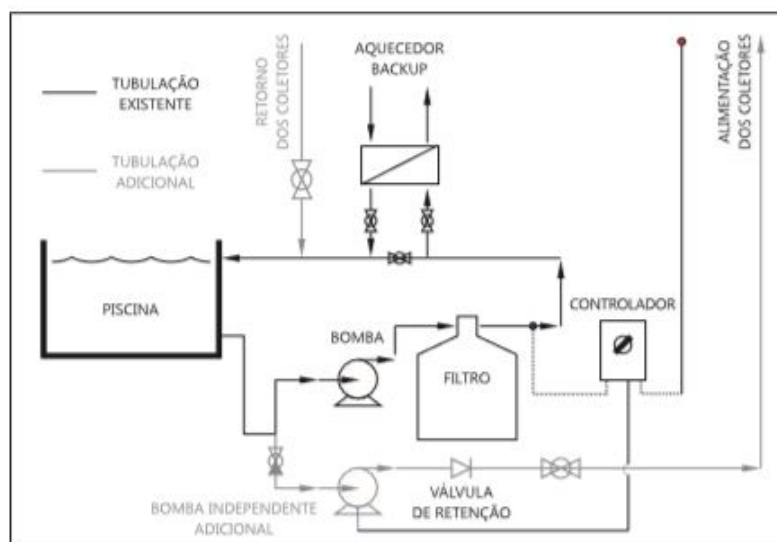


Figura 16 – Esquema de interligação hidráulica de um sistema típico.

Fonte – soletrol.com.br.

3.1.3 Composição e Vantagens

3.1.3.1 Composição

Os painéis coletores de polipropileno foram desenvolvidos para poder absorver o máximo de energia em sua superfícies, de maneira que o máximo da irradiação solar seja convertida e transmitida para a água, que flui nos pequenos dutos interno do coletor.

3.1.3.2 Vantagens

a) Grande área de absorção: A área de absorção é a superfície que capta a energia solar que, no caso dos coletores de polipropileno, representa a área dos painéis e inclui os tubos de cabeceira e acessórios, feitos do mesmo material.

b) Alto grau de eficiência: Por possuir cobertura de policarbonato transparente, esse modelo de coletor solar propicia a formação do efeito estuda em seu interior e também minimiza a perda de eficiência pela ação dos ventos. Com isso, o aquecimento da piscina e as condições de sua utilização se estendem por um período maior no ano.

c) Perda de carga desprezível no painel: O painel é composto de pequenos canais paralelos e lisos, causando uma resistência mínima a passagem de água e consequentemente, um consumo mínimo de energia pela bomba.

3.1.4 Módulos, Painéis e Baterias

Os coletores são manufacturados a partir de módulos individuais e soldados ainda na fábrica, em grupo de quatro módulo ou mais para formar um painel (ou coletor). Os painéis são conectado durante a instalação para formar as baterias de diferentes números de coletores, dependendo de sua necessidade. Um sistema de aquecimento solar consiste de uma ou mais baterias conectadas a piscina, através do seu sistema de bombeamento.



Figura 17 – Módulo.

Fonte – soletrol.com.br.

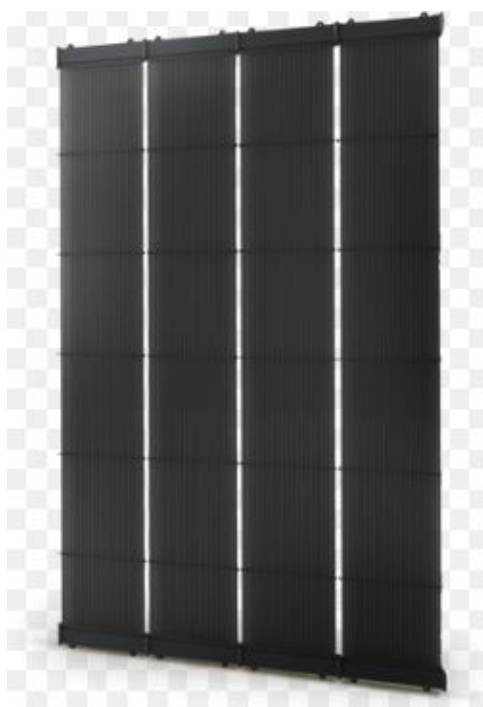


Figura 18 – Paineis.

Fonte – soletrol.com.br.



Figura 19 – Bateria.

Fonte – soletrol.com.br.

3.1.5 Características Técnicas

A Figura 20 refere-se a coletores de tamanho padrão de 3 x 0.5 m e 4 x 0.5 m.

COLETOR SOLAR ACF		
MODELO	PLACAS 3 X 0,5M	PLACAS 4 X 0,5M
	10003	10004
Largura (m)	0,50m	0,50m
Comprimento	3m	4m
Espessura	10mm	10mm
Área	1,5m²	2m²
Matéria Prima	Polipropileno Copolímero Virgem com Anti UV	
Número de tubos	37	
Entrada e Saída	50mm	
Peso Vazio	3,45Kg	4,45Kg
Peso Cheio	11,3Kg	13,5Kg
Pressão de teste	5 Kgf/cm² / 500KPa / 50 mca	
Pressão Máxima de Operação	2 Kgf/cm² / 200KPa / 20 mca	

Figura 20 – Especificação Técnica do Coletor Solar ACF.

Fonte – soletrol.com.br.

Faixa de vazão de MAIOR desempenho térmico: 250 a 300 litros/h/ m^2 de coletor.

3.1.6 Dimensionamento

Para um perfeito funcionamento e desempenho do sistema solar é importante dimensionar adequadamente:

- a) Número de coletores;
- b) Arranjo hidráulico;
- c) Tubulação;
- d) Bomba;

Para isso será necessário o conhecimento dos seguintes itens, dados de entrada:

- Área da piscina: $8m \times 4m = 32m^2$
- Tipo de uso da piscina: Residencial
- Uso do controlador solar para gerenciamento do sistema
- Uso de capa térmica ou piscina coberta: Capa térmica
- Clima da região (altitude, incidência de ventos, etc.): Muito quente
- Localização da piscina (sombrio ou ensolarado): Ensolarado
- Temperatura desejada da água: Até $32^{\circ}C$

Os coletores devem ser instalados voltados ao Norte geográfico, com um desvio máximo de 15° sem afetar seu desempenho, se isso não for possível, será necessário

acrescentar além do recomendado mais 10% a 20% da área correspondente em coletores. A instalação hidráulica deve ser dimensionada de tal forma que suporte a vazão que todo sistema requer. Recomenda-se uma vazão por metro quadrado de coletor solar de até 250 l/h/m².

Poderá ser previsto no projeto um sistema de apoio para aquecimento da água, onde há necessidade do uso da piscina mesmo quando não houver Sol por longos períodos. Obs: Se for previsto um sistema auxiliar, deverá ser solicitado um controlador com canal adicional para acionamento

O dimensionamento pode ser feito seguindo os passos a seguir:

1º passo: escolher o modelo de coletor que melhor se adapte ao telhado;

2º passo: consultar a tabela de relação de área de acordo com o tipo da piscina;

3º passo: calcular o número de coletores utilizando a tabela de relação de área e considerando o arranjo hidráulico.

4º passo: calcular a vazão necessária no sistema;

5º passo: escolher o tipo de tubulação correta e especificar a bitola utilizando a tabela de vazão máxima.

6º passo: especificar a bomba hidráulica utilizando a vazão calculada e a altura manométrica necessária.

3.1.6.1 1º passo: Escolhendo o melhor modelo de coletor

O importante nesse 1º passo é a área de cada coletor que irá absorver a radiação solar, com esse valor calcularemos o área total que precisa para aquecer a piscina.

Adotaremos os seguintes valores para dados de entrada para a resolução do problema:

Tabela 1 – Dados de entrada para os cálculos das placas.

ITEM	TAMANHO
Coletor Solar	1,5 m ²
Piscina	32 m ²

Fonte: Autor.

3.1.6.2 2º passo: Consulta da tabela de área

Área coletora necessária para repor as perdas térmicas diárias da piscina.

Para tornar mais prático o dimensionamento dos coletores formulou-se uma tabela com 24 variações de área recomendada.

Relação de Área Recomendada		Clima							
		Muito Quente		Quente		Frio		Muito Frio	
		Piscinas							
Aplicação	Temperatura	Fechada	Aberta	Fechada	Aberta	Fechada	Aberta	Fechada	Aberta
Clubes	28°C a 30°C	0.70	0.80	0.90	1.00	1.00	1.10	1.20	1.30
Residências e Academias	30°C a 32°C	0.80	0.90	1.00	1.10	1.10	1.20	1.20	1.30
Fisioterapia e SPAS	34°C	1.20	1.30	1.30	1.40	1.40	1.50	1.60	1.70
Exemplos de referência quanto às variações climatológicas		Cuiabá, Campo Grande, Fortaleza, Recife, etc.		Belo Horizonte, Birigui, Rio de Janeiro, Uberaba, etc.		São Paulo, Florianópolis, Poços de Caldas, Londrina.		Campos do Jordão, Curitiba, Porto Alegre, Serra Gaúcha, etc.	

Figura 21 – Variações de áreas recomendadas em diferentes locais e ambientes.

Fonte – komeco.com.br.

Esta tabela leva em consideração as seguintes proposições:

- uso de capa térmica;
- tempo de uso da piscina de 8 horas;
- velocidade do vento de 0,2 m/s em piscinas fechadas e 1,0m/s em piscinas abertas;
- piscina com alto índice de agitação;
- coletores solares voltados para o norte geográfico e inclinação média do telhado de 15°.
- Piscinas até 100 m² (para piscinas maiores, deve-se avaliar individualmente cada caso).

Em caso de instalação com desvio do norte geográfico, utilizar a Figura 22 de compensação de área:

Orientação	Compensação
Norte geográfico	Ideal
Desvio de 45°	15%
Desvio de 90°	25%

Figura 22 – Compensação de área.

Fonte – transsen.com.br.

3.1.6.3 3º passo: Número de coletores

Para dimensionar a área coletora, verifique a tabela de relação de área recomendada de acordo com o tipo de piscina e calcule a área necessária de coletores.

$$\text{Número de coletores} = \frac{\text{Área da piscina} * \text{Relação de Área}}{\text{Área do coletor utilizado}} \quad (3.1)$$

Para uma piscina residencial, temperatura desejada de 32°C, com área de 32 m², instalada em uma região de clima muito quente(Dourados - MS), sem cobertura (aberta), com capa térmica, utilizando-se coletores de 1.5m x 0.5m, instalados voltados para o norte, calcula-se:

Área do coletor utilizado: 1.5m²

Área da piscina a ser aquecida: 32m²

Relação de área conforme a Figura 21: 0.9

$$\text{Número de coletores} = \frac{32 * 0.9}{1.5} \quad (3.2)$$

Número de coletores calculados: 19.2

Número de coletores dimensionados: 19

3.1.6.4 Definição do Local da Instalação dos Coletores

Os coletores poderão ser instalados sobre qualquer superfície plana ou inclinada, como lajes, telhados ou suportes previamente projetados para recebê-los.

Condições Necessárias:

1. A área deverá ter espaço suficiente para receber os coletores sem que haja sobreposição dos mesmos.
2. Os coletores devem ser montados em posição inclinada, podendo desta forma receber melhor a incidência de Sol.
3. Verifique se a estrutura onde será montado os coletores suporta o peso total do sistema em funcionamento (peso dos coletores mais a água em seu interior).
4. A presença de obstáculos, sejam eles naturais como árvores e galhos ou construções próximas a instalação, podem prejudicar a eficiência do sistema devido ao sombreamento.
5. Se for desenvolvido algum tipo de suporte para os coletores, certifique-se que no projeto eles sejam fechados na parte inferior, desta forma evita-se perdas de calor pela circulação de ar.

6. Lembre-se que a face inclinada dos coletores deverá estar voltada ao Norte geográfico.

7. O espaço escolhido para instalação deverá permitir um livre acesso para montagem, sem que haja necessidade de se caminhar sobre os coletores.

3.1.6.5 4º passo: Vazão

Para calcular a vazão dos coletores é necessário saber qual é a área coletora influente, ou seja, a área coletora que interessa para o cálculo da vazão. Para sistemas em série, considerar a primeira bateria para o cálculo. Para sistemas em paralelo, considerar a quantidade de baterias em paralelo.

A primeira bateria alimentada é a que influi no dimensionamento da tubulação e da bomba hidráulica.

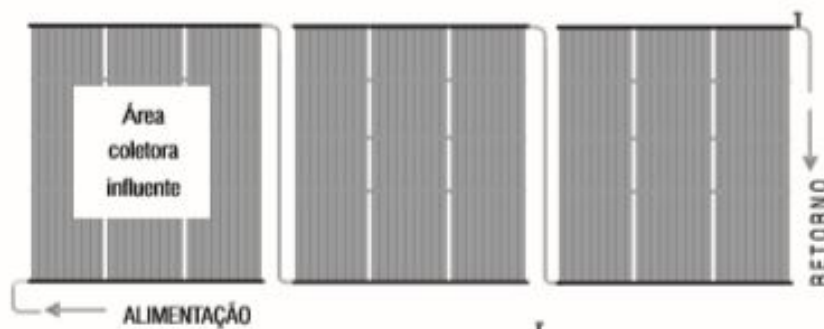


Figura 23 – Baterias ligadas em série.

Fonte – transsen.com.br.

No caso de baterias em paralelo, calcule a área coletora das primeiras baterias de cada série.

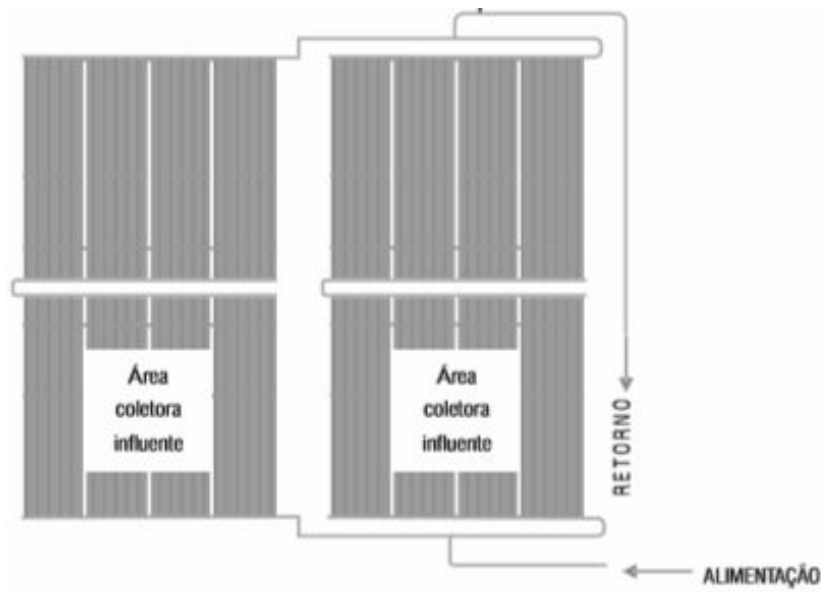


Figura 24 – Baterias ligadas em série e paralelo.

Fonte – transsen.com.br.

$$\text{Área Influyente} = \text{Área do Coletor} * \text{Número de coletores por bateria} * \text{Número de baterias em paralelo} \quad (3.3)$$

Utilizando os 19 coletores dimensionados e 2 baterias em série de 9 no primeiro e 10 coletores no segundo.

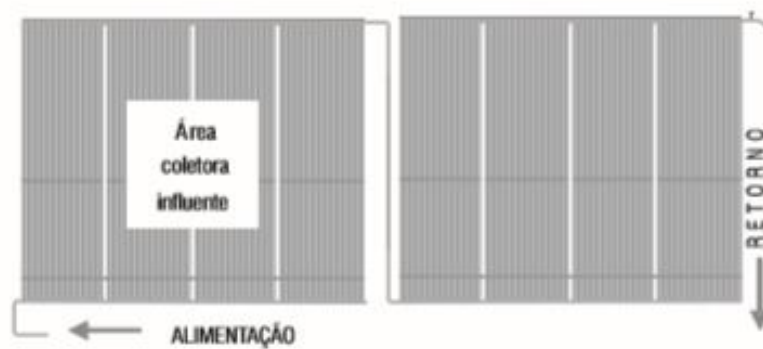


Figura 25 – 9 Coletores em série na primeira bateria e 10 na segunda.

Fonte – transsen.com.br.

$$\text{Área Influyente} = 2 * 9 = 18 \quad (3.4)$$

$$\text{Vazão} = \text{Faixa de Vazão} * \text{Área Influyente} \quad (3.5)$$

$$Vazão = 250l/h/m^2 * 18m^2 = 4500l/h = 4.5m^3/h \quad (3.6)$$

3.1.6.6 5º passo: Tubulação correta

Continuando o dimensionamento, e agora partindo para a tubulação de entrada e saída dos coletores, como a vazão foi de 4.5m³/h, então o diâmetro do tubo vai ser de 40mm segundo a Figura 26

Diâmetro de tubo em PVC		Vazão em m ³ /h
1.1/4"	40 mm	Até 8,8
1.1/2"	50 mm	Até 13,7
2"	60 mm	Até 20,2
2.1/2"	75 mm	Até 31,3
3"	85 mm	Até 40,4
4"	110 mm	Até 67,6

Figura 26 – Relação dos diâmetros dos tubo pela vazão.

Fonte – transsen.com.br.

Nunca deve se utilizar tubulação de cobre em instalações de aquecimento solar para piscina, e a tubulação de entrada/saída não deve ser menor que 40mm, devido a perda de carga que o fluido oferece a bomba se tornaria relevante.

3.1.6.7 6º passo: Bomba

Para determinar a potência necessária da bomba, seguir esses 3 passos:

1º Passo: Calcular a vazão necessária ou pegar tabelado.

2º Passo: Determinar altura manométrica da bomba. Considerar o desnível entre coletores e casa de máquinas e perda de carga em registros, válvulas, conexões e filtro.

3º Passo: Consultar o catálogo de fabricante de bomba utilizando a vazão necessária e a altura manométrica considerada

3.1.7 Instalação Hidráulica

Apesar da praticidade, a interligação entre coletores não pode ser feita de forma indiscriminada. Para garantir o equilíbrio hidráulico e eficiência térmica do sistema, deve-se respeitar o limite máximo de coletores por bateria em cada modelo de coletor solar, recomenda-se que um máximo de 10 coletores solares em uma bateria.

Há várias formas de se interligar os coletores solares. A mais comum delas é através de uma única bateria (conjunto simples), conforme a Figura 27.

Sempre após última bateria alimentada deve ser feito um sifão invertido (cavalete conforme imagens) para garantir que o coletor ficará totalmente cheio de água

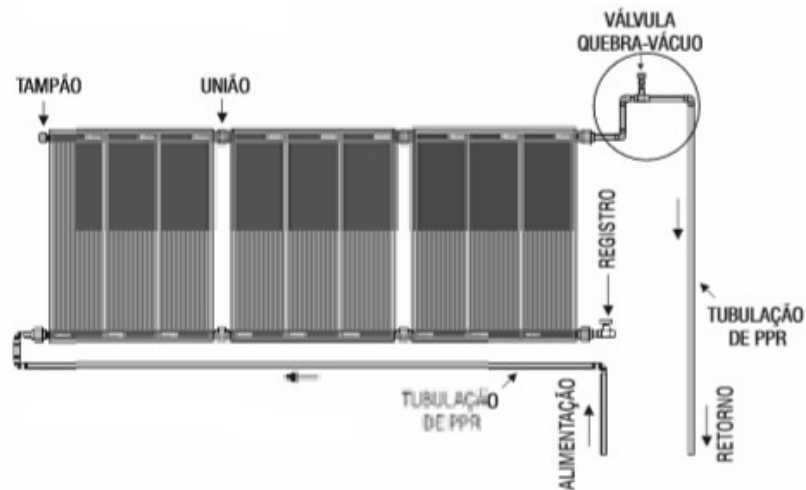


Figura 27 – Bateria simples.

Fonte – transsen.com.br.

No entanto, em situações em que o espaço disponível é pequeno ou o número de coletores dimensionados extrapola o limite máximo recomendado, deve-se dividir os coletores no máximo em 2 baterias em série ou 3 baterias em paralelo, conforme a figura 28 29 30 31.

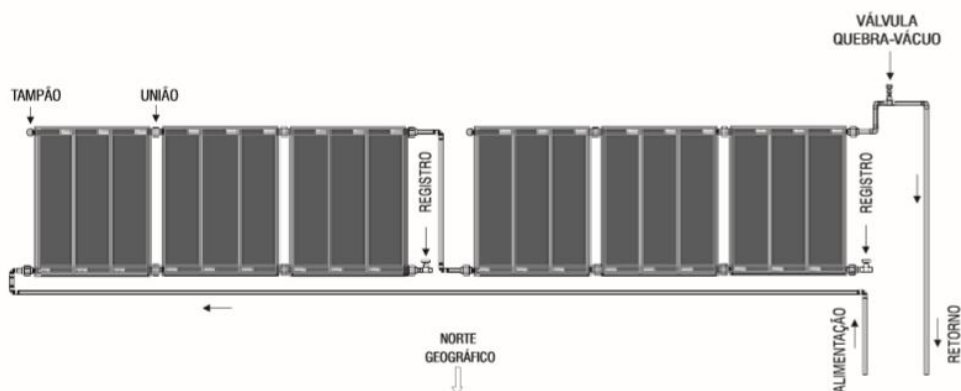


Figura 28 – Baterias ligadas em série na horizontal.

Fonte – transsen.com.br.

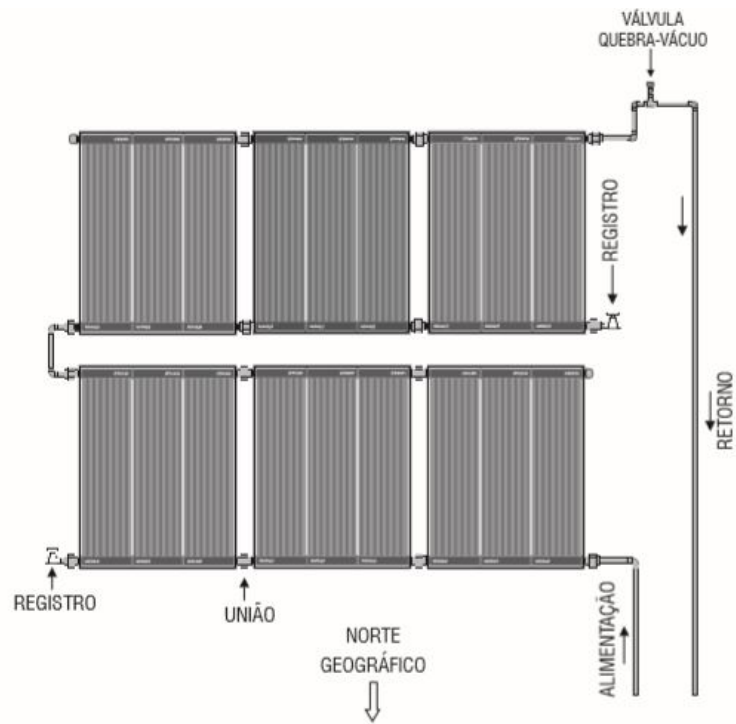


Figura 29 – Baterias ligadas em série na vertical.

Fonte – transsen.com.br.

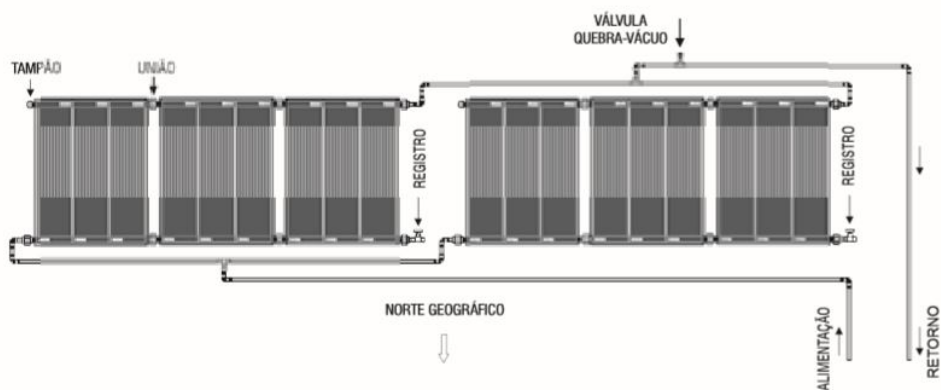


Figura 30 – Baterias ligadas em paralelo na horizontal.

Fonte – transsen.com.br.

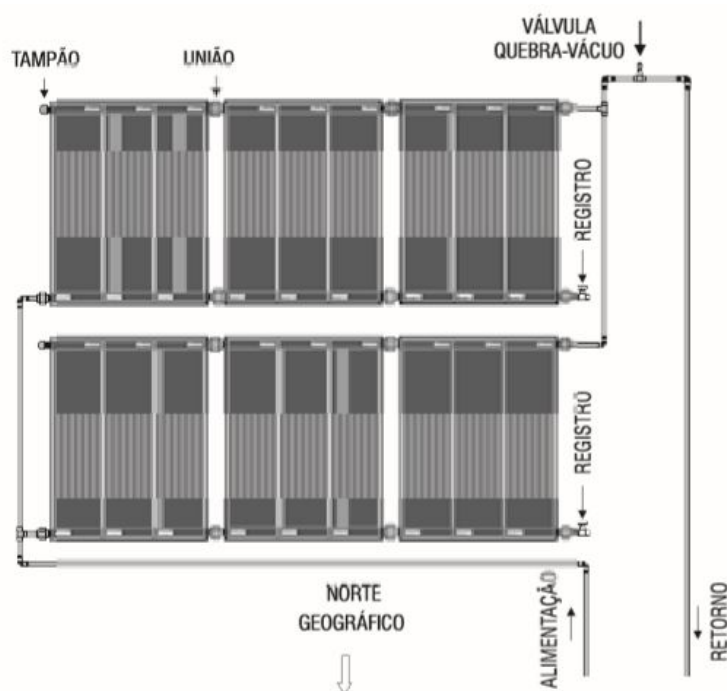


Figura 31 – Baterias ligadas em paralelo na vertical.

Fonte – transsen.com.br.

Para que o sistema de aquecimento solar tenha um bom equilíbrio hidráulico e conseqüentemente, bom desempenho térmico, é fundamental que na interligação entre as baterias (conjuntos) de coletores entre linhas respeitadas as seguintes regras:

- Não instale mais que 3 baterias (conjuntos) de coletores em série. O coletor solar tem seu limite térmico, ou seja, a partir da terceira bateria, a água já absorveu grande parte da energia térmica que o sistema de aquecimento solar pode fornecer, portanto inserir mais baterias em série é desperdício;
- Não instale mais de 3 ramais de alimentação de baterias (conjuntos) em paralelo. Circuitos hidráulicos com mais de 3 ramais de alimentação não garantem equilíbrio hidráulico na alimentação das baterias de coletores, comprometendo a eficiência térmica de sistema;
- A alimentação ou retorno dos coletores deve estar compensado, ou seja, a trajetória por onde a água passa deve ter comprimentos iguais, conforme as Figuras 30 e 31. Desta forma, garante-se que a vazão nas baterias será a mesma;
- O circuito hidráulico entre coletores e casa de máquinas deve ser o mais curto e o mais simplificado possível. Sempre que possível, evite utilizar joelhos 90°, eles oferecem alta resistência hidráulica (perda de carga) à passagem da água. O retorno dos coletores deve ser sempre mais curto que a alimentação, desta forma a perda térmica é menor;

3.1.8 Detalhes da Tubulação- Entrada e Saída de Água

- A entrada de água é sempre conectada na parte mais baixa da bateria, e a saída no canto superior oposto.
- É melhor conectar a entrada ao ponto mais distante da bateria em relação à piscina. Dessa forma a saída da bateria estará mais próxima da piscina, reduzindo as perdas de calor.
- Use o princípio de "retorno reverso" (Tichelmeann) para garantir o equilíbrio de fluxo entre as baterias.

3.1.9 Capa Térmica

Reduz significativamente as perdas térmicas da piscina. É de uso obrigatório nos períodos em que a piscina não é utilizada. Afinal, sabe-se que 90% a 95% das perdas térmicas de uma piscina ocorre pela superfície, daí a necessidade de protegê-la.

A capa térmica ideal é aquela confeccionada com plástico bolha e deve ser instalada com as bolhas viradas para a lâmina d'água. Capas fabricadas em lona não apresentam o mesmo desempenho porque não formam um "colchão de ar" entre a lâmina d'água e o plástico. Este "colchão de ar" é o grande responsável pelo isolamento térmico da piscina.

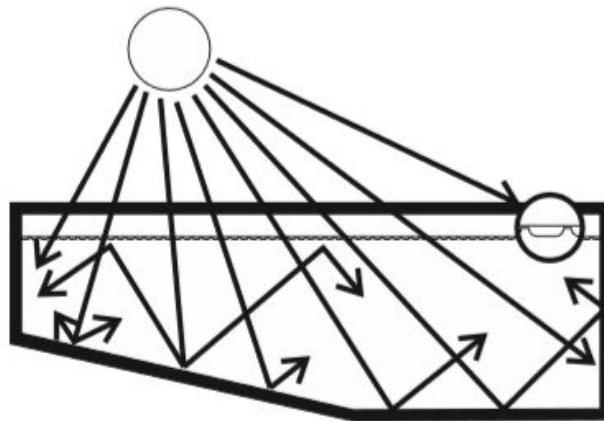


Figura 32 – Piscina com capa térmica.

Fonte – soletrol.com.br.

3.2 Análise Computacional

Essa etapa de análise computacional foi dividida em 3 partes para melhor elucidação do projeto: Pré-processamento, simulação e pós-processamento.

O pré-processamento abrange o desenho em CAD, a elaboração da malha, escolha do escoamento desejado e condições de contorno existentes. Essa etapa é de suma importância para o resultado final, pois é nela que se define as características gerais do projeto.

Na simulação, o próprio software resolve as equações do problema aplicando as condições de contorno inseridas e chegando aos resultados.

E na última parte da resolução do problema, o pós-processamento, utilizou-se o software CFD POST para a visualização dos resultados em formas de gráficos, imagens e tabelas.

3.2.1 Geometria do projeto

Desenhou-se a geometria da placa coletora na ferramenta de desenho do próprio software, chamada DesignModeler. O desenho foi simplificado em 1/4 do valor real, ficando com o dados mostrado na Tabela 2, pois teve-se a limitação de usar o software ANSYS FLUENT na licença acadêmica, que restringe bastante ferramentas e modelos para se aplicar, a Figura 33 mostra a geometria da placa coletora.

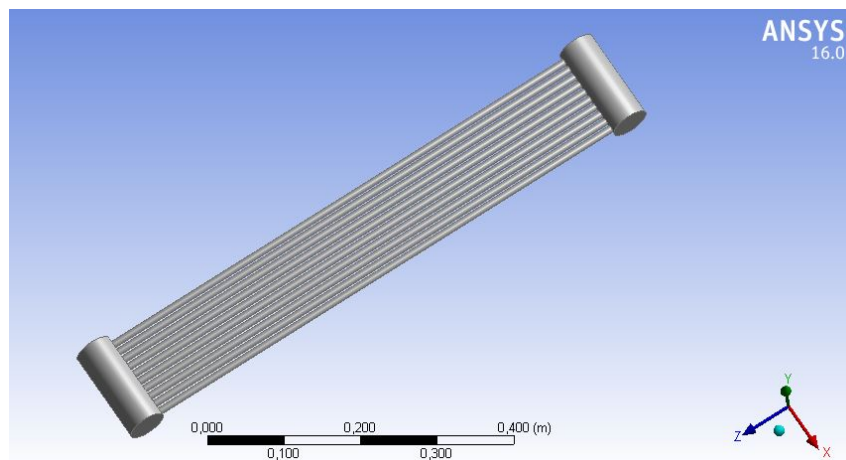


Figura 33 – Geometria do coletor solar.

Fonte – Autor.

Tabela 2 – Dados de entrada para a geometria.

ITEM	TAMANHO
Comprimento	0,75 m
Largura	0,13 m
Tubo Principal	D 0,05 m
Tubo secundário	D 0,01 m

Fonte: Autor.

3.2.2 Malha

Nesta etapa cria-se uma malha, ou seja, divide-se em pequenas partes de geometria regular, para que o software possa realizar os cálculos em todo o volume de controle. A criação dessa malha deve-se tomar um cuidado em excesso, pois as equações de resolução do problema estão ligadas a malha, e portanto, para que o resultado possa convergir e ser confiável tem que se escolher com cuidado essa malha. Neste trabalho utilizou-se cerca de 510 mil elementos, porém essa é uma das limitações da licença acadêmica, pois o máximo que se pode criar é 512 mil elementos, e para o nosso caso se torna pouco pela geometria do coletor.

A Figura 34 e a Figura 35 representa a malha do projeto completo, e a Figura 36 foca em pontos críticos do projeto, que necessitava de refinamento da malha para melhores resultados no local.

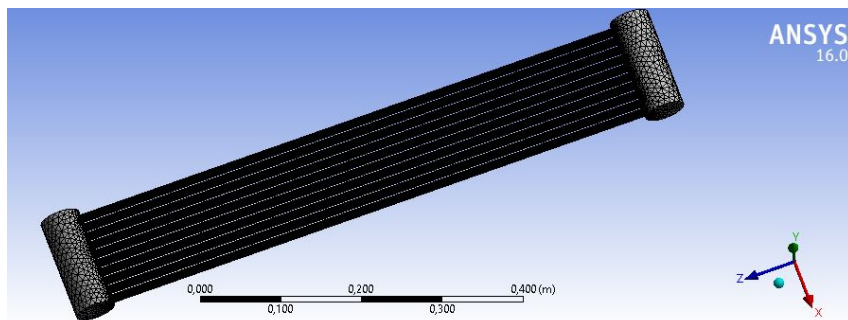


Figura 34 – Malha completa.

Fonte – Autor.

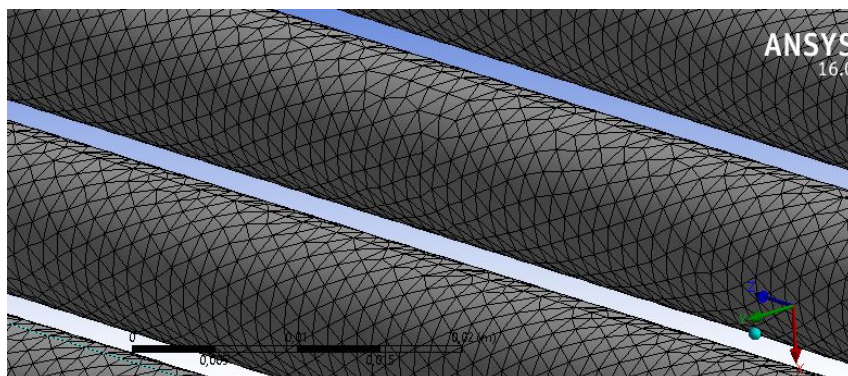


Figura 35 – Malha da tubulação.

Fonte – Autor.

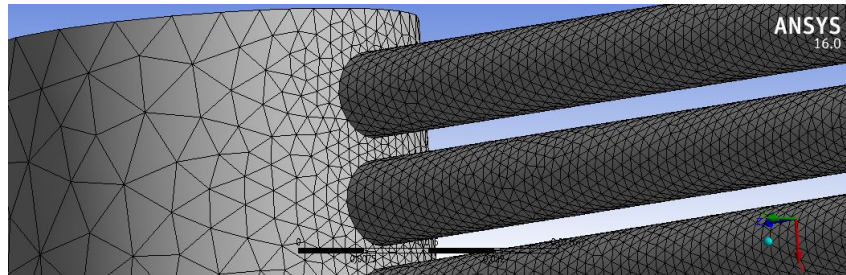


Figura 36 – Refino da malha em pontos críticos.

Fonte – Autor.

3.2.3 Modelo de turbulência

Adotou-se o k-epsilon para modelo de turbulência, pois é muito econômico em relação a processamento e tem uma boa precisão. E para tornar a simulação ainda mais precisa foi usado métodos de segunda ordem para resolução das equações.

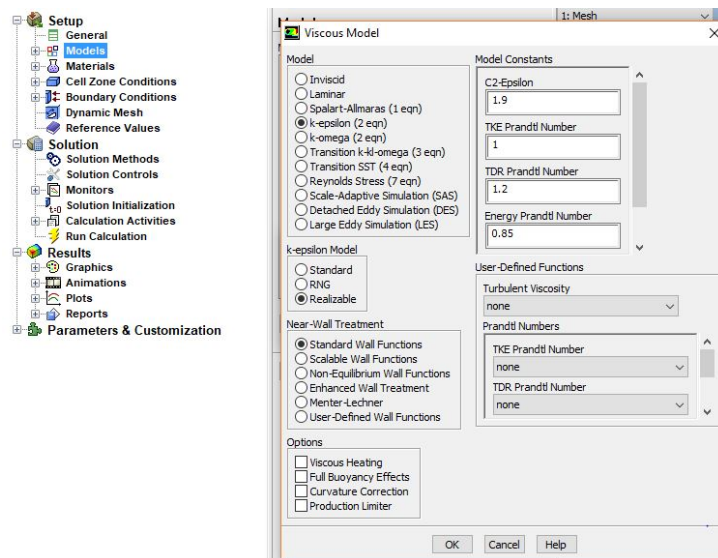


Figura 37 – Modelo de turbulência adotado.

Fonte – Autor.

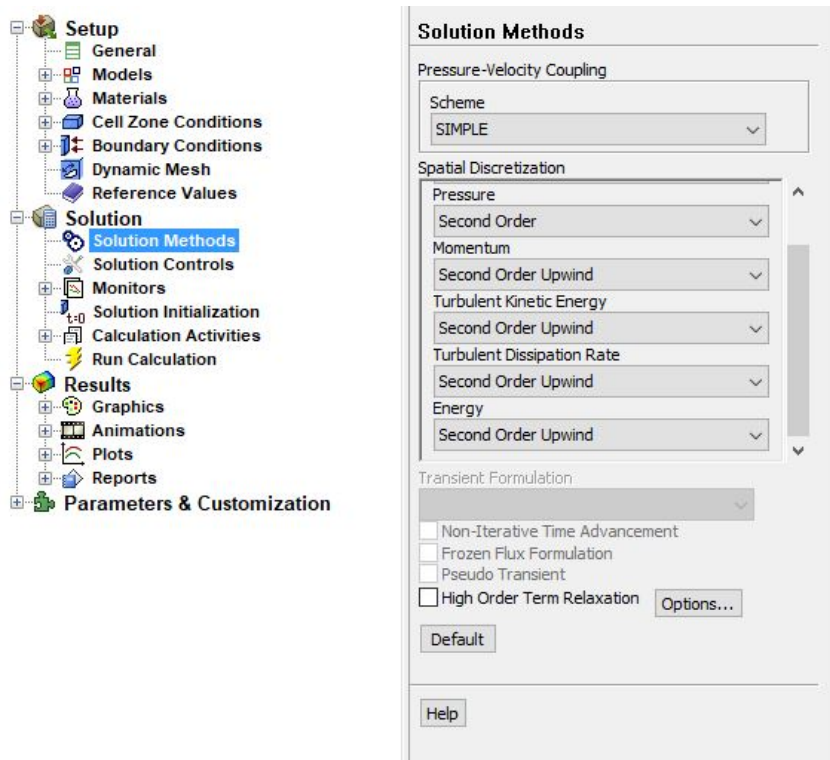


Figura 38 – Métodos de segunda ordem.

Fonte – Autor.

3.2.4 Condições de contorno

Adotou-se as seguintes condições de contorno para a simulação:

Na entrada(inlet): Representada na Figura 39 e Figura 40

$V_{inlet} = 0,16$ m/s, determinada com base na vazão de 4500l/h e o diâmetro de entrada de 50 mm da tubulação.

$T_{inlet} = 300$ K, adotada a temperatura ambiente.

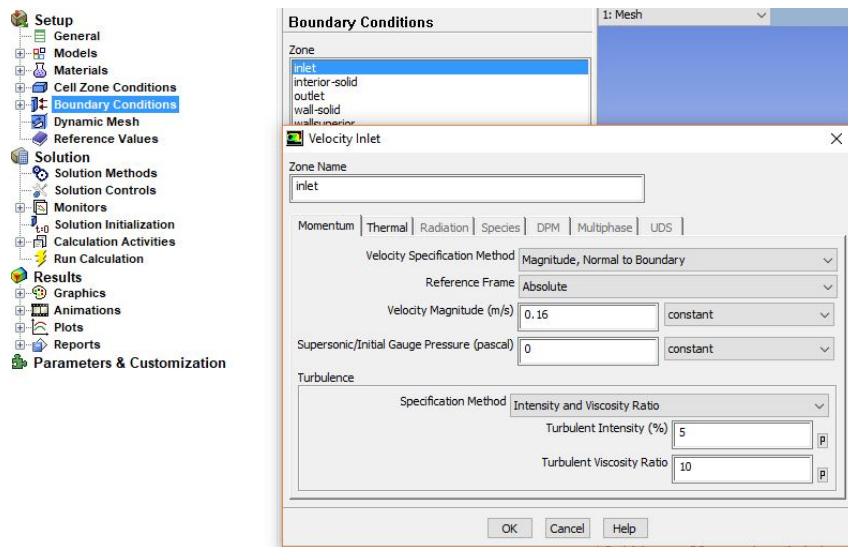


Figura 39 – Velocidade de entrada.

Fonte – Autor.

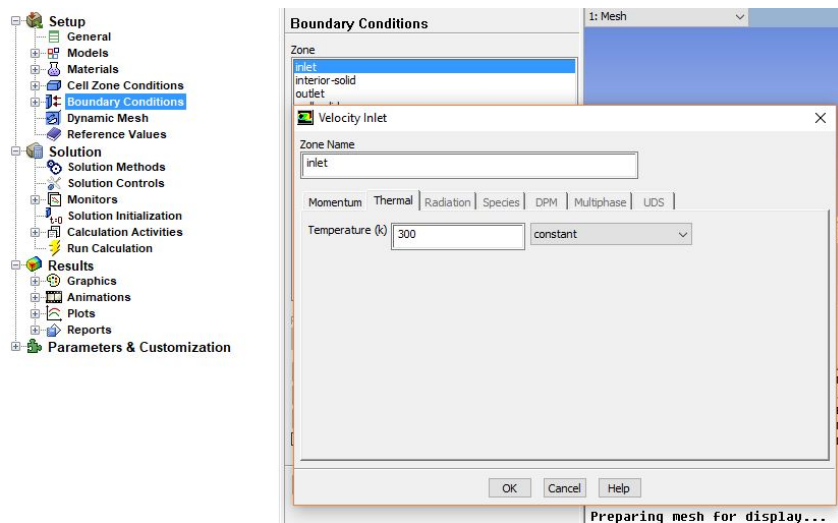


Figura 40 – Temperatura de entrada.

Fonte – Autor.

Na saída(outlet): Representada na Figura 41 e Figura 42

$P_{outlet} = -20000$ Pa, adotado uma altura manométrica de 3 metros e uma profundidade de saída da piscina de 1 metro.

Tambiente = 300 K, adotado a temperatura ambiente.

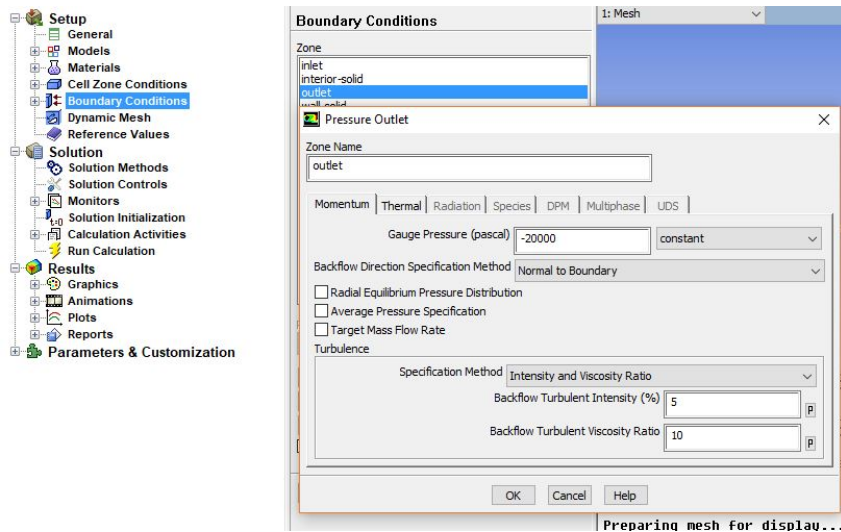


Figura 41 – Pressão de saída.

Fonte – Autor.

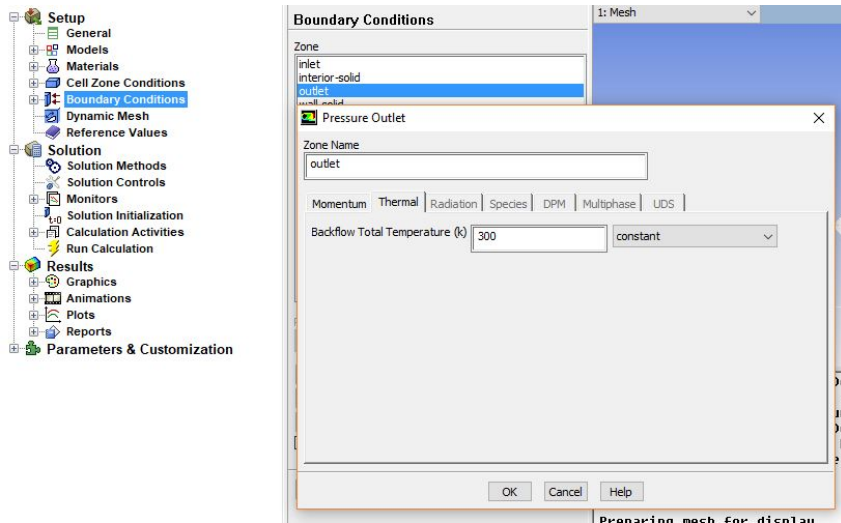


Figura 42 – Temperatura ambiente.

Fonte – Autor.

Na parede(Wallsuperior): Representada na Figura 43 e Figura 44

Fluxo de calor = 450 W/m^2 , adotado o fluxo de calor incidente da radiação solar no mês de dezembro na cidade de Dourados - MS.

Rugosidade do Material = $0,023$

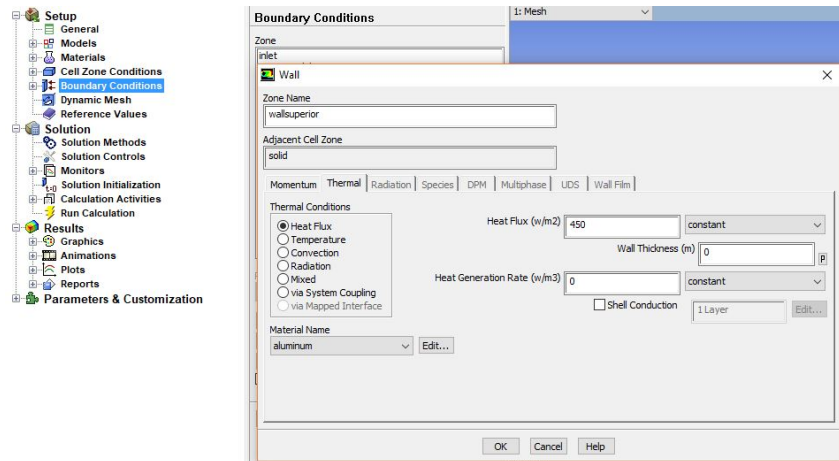


Figura 43 – Fluxo de calor.

Fonte – Autor.

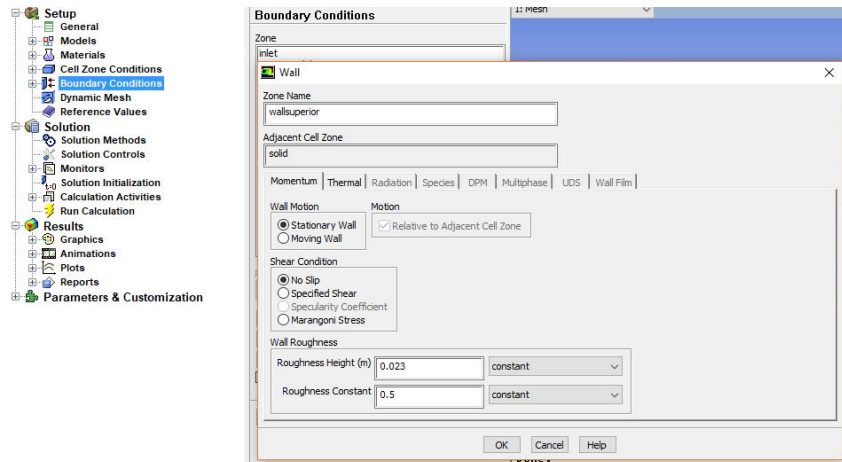


Figura 44 – Rugosidade do material.

Fonte – Autor.

3.2.5 Simulação

Atribui-se 200 interações para a simulação como mostrado na Figura 45, para que houvesse tempo de convergir para o resultado, e o resultado final tem que ser independente do número de interações da simulação, ou seja, mesmo variando o número de interações, o resultado não pode mais variar, por isso geralmente escolhe-se de 200 interações para cima, dependendo do grau de relevância do projeto.

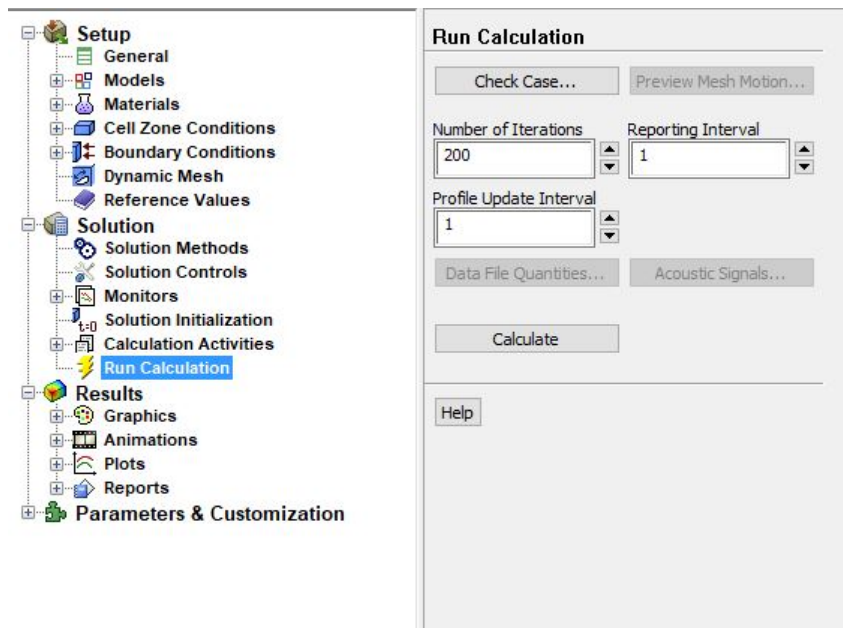


Figura 45 – Número de interações.

Fonte – Autor.

3.2.6 Pós-Processamento

Ainda no FLUENT, pode-se observar se a simulação ocorreu de forma correta e se convergiu para o resultado, que nesse caso, convergiu antes mesmo de atingir o número de interações máxima estabelecida, que seria 200, porém convergiu na 197 através das equações governantes mostrada no gráfico residual da Figura 46 .

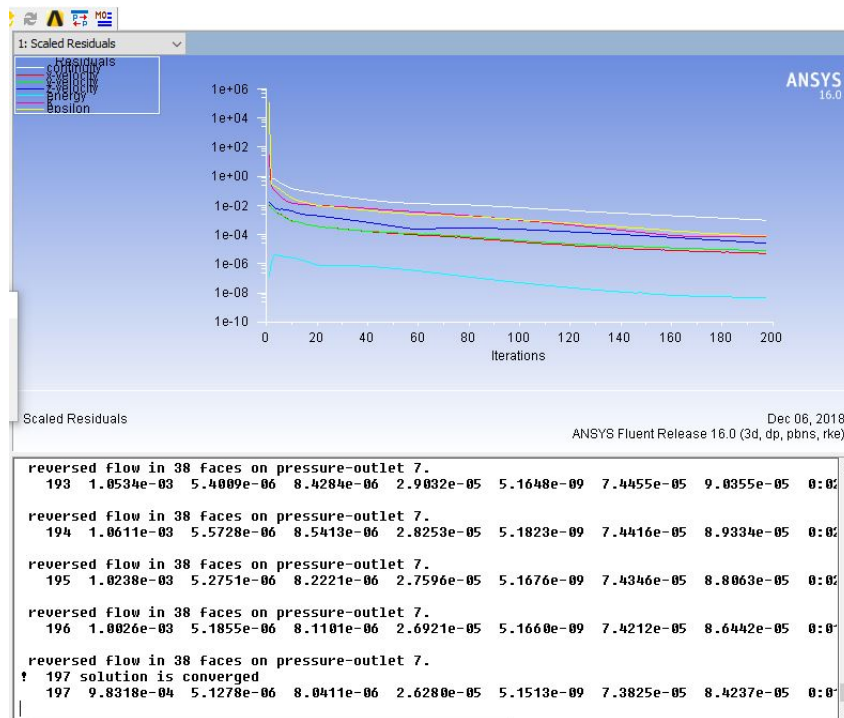


Figura 46 – Gráfico residual - convergência.

Fonte – Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados os resultados obtidos pelas simulações realizadas utilizando o software ANSYS FLUENT, de uma placa coletora de energia solar, afim de comparar com os resultados apresentados pelo catálogo do fabricante dessas placas coletoras.

4.1 Simulações realizadas

Analisaremos 4 tipos de resultados que nos interessam: Temperatura, Pressão, Velocidade e Perda de Carga.

4.1.1 Temperatura

Após a incidência de um fluxo de calor, representando os raios solares incidindo na placa, a água que vai escoando da entrada para a saída tem a sua temperatura elevada pela irradiação solar, como mostrado na Figura 47.

O fluido entra com a temperatura ambiente de 300 K e após um único deslocamento pela placa sai com 300,1 K, e em certo pontos, como representado pela figura 47 sai com a temperatura ainda maior, chegando ate 300,3 K, aproximadamente.

O que está totalmente verídico, pois após várias passagens pelos coletores solares o fluido deve se aquecer até atingir a temperatura ideal na piscina de até 305K após circulações pela placa ele cessa seu movimento, senão a água continua esquentando como mostrado pelas Figuras 47 e 48.

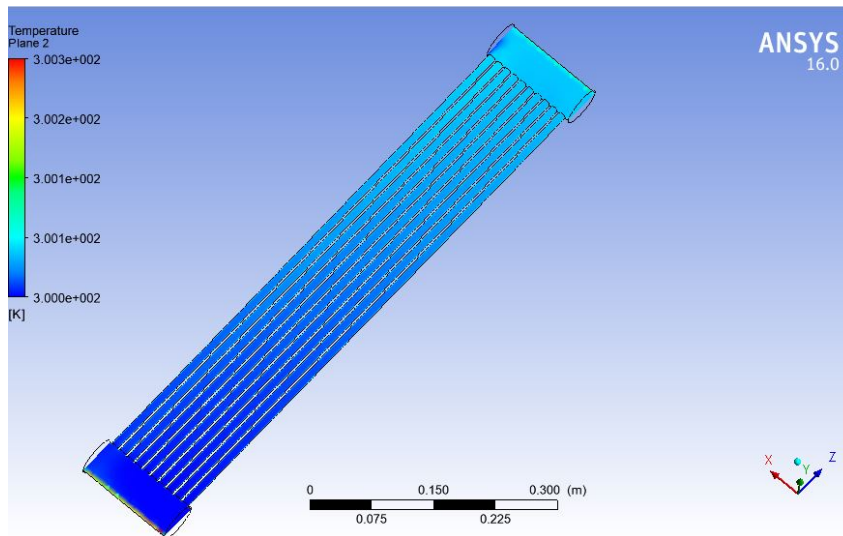


Figura 47 – Temperatura ao longo do coletor solar.

Fonte – Autor.

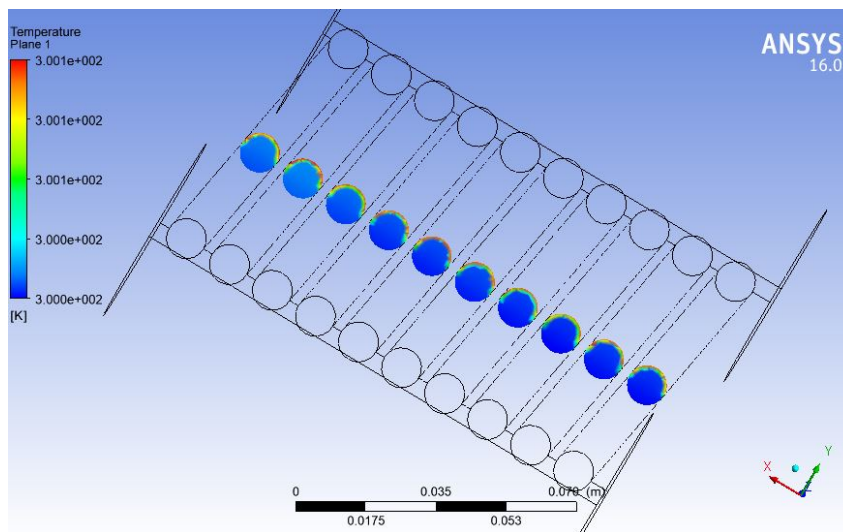


Figura 48 – Temperatura nos tubos coletores.

Fonte – Autor.

4.1.2 Pressão

A pressão está maior na entrada e menor na saída, pois na entrada a bomba que mantém a pressão alta, e conforme vai percorrendo o caminho tem a gravidade que atrapalha o movimento e as perdas de carga envolvidas, mesmo que seja mínima, como será representada na próxima sessão, é o suficiente para causar essa diferença de pressão, responsável pelo escoamento do fluido, pois sem diferença de pressão o fluido não escoaria.

A figura 49 representa a diferença de pressão ao longo de todo o coletor solar, a pressão de saída foi fixada em -20000Pa e já a pressão de entrada é maior dando -19160Pa ,

esse diferença foi baixa por dois motivos: Primeiro que como mencionamos anteriormente, a placa é um modelo simplificado de 1/4 da placa original, e está represento somente uma, e por causa das minimas perdas de carga também, se o modelo tivesse mais placas essa pressão se aproximaria mais próxima do catálogo do coletor, e já a Figura 50 representa a pressão nos tubos coletores.

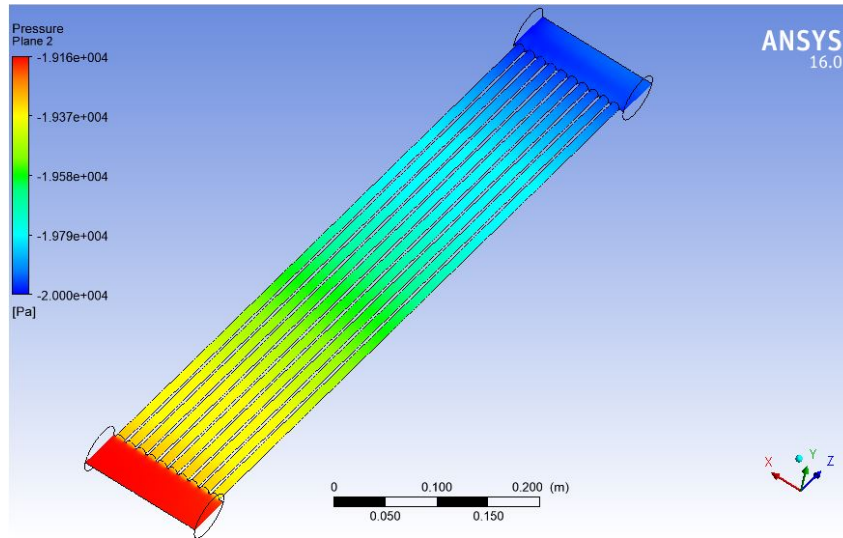


Figura 49 – Pressão ao longo do coletor solar.

Fonte – Autor.

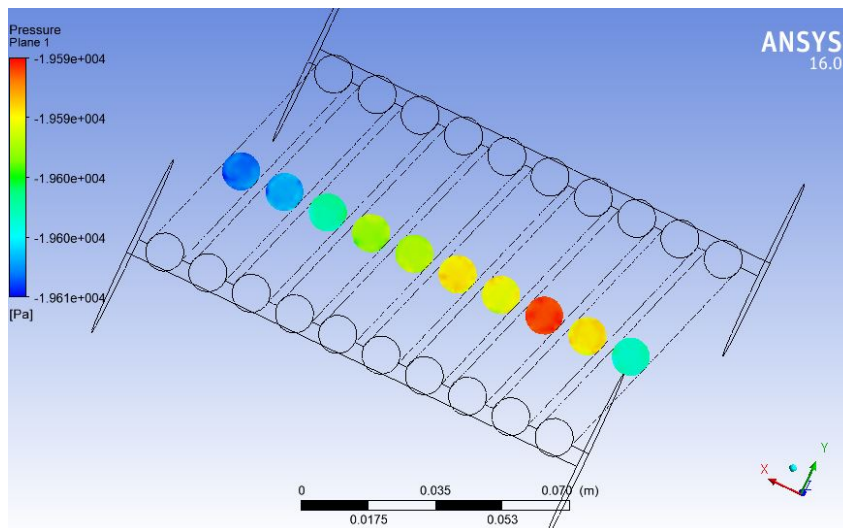


Figura 50 – Pressão nos tubos coletores.

Fonte – Autor.

4.1.3 Velocidade

Percebe-se pelas Figuras 51 e 52 um aumento da velocidade por causa da diminuição da área, ou seja, após o fluido entrar no coletor solar ele passa para os pequenos tubos

dos coletores, onde sua velocidade aumenta pois a área dos mesmo é muito menor do que do tubo de entrada (10 mm pros tubos, e 50 para o de entrada), após percorrer todo o caminho do escoamento dos tubos coletores ele diminui sua velocidade, pois volta para o tubo principal (de 50mm) onde irá sair do coletor solar.

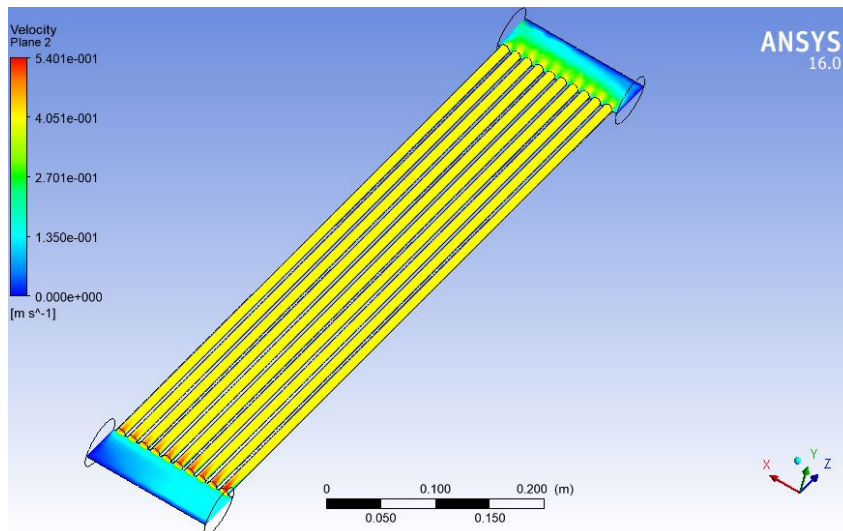


Figura 51 – Velocidade no coletor solar.

Fonte – Autor.

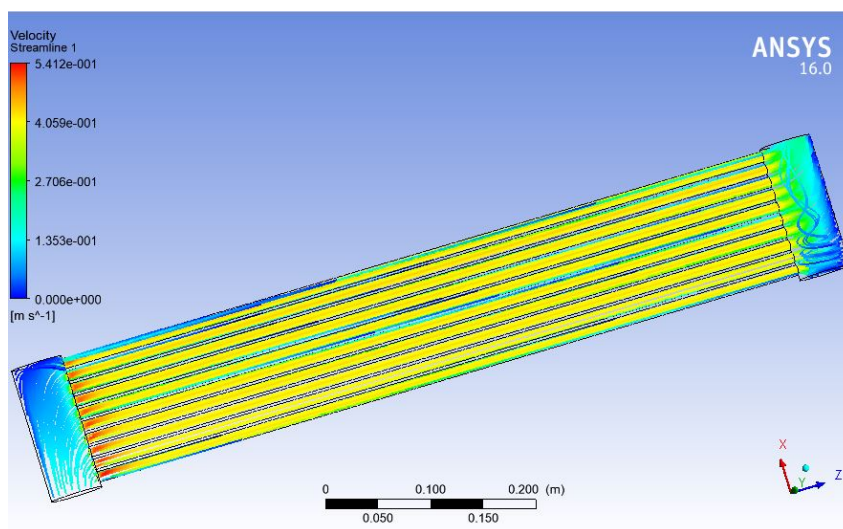


Figura 52 – Linhas de velocidade no coletor solar.

Fonte – Autor.

Nas figuras 53 e 54 representam o aumento de velocidade do fluido saindo da tubulação principal para entrar nos tubos dos coletores solares.

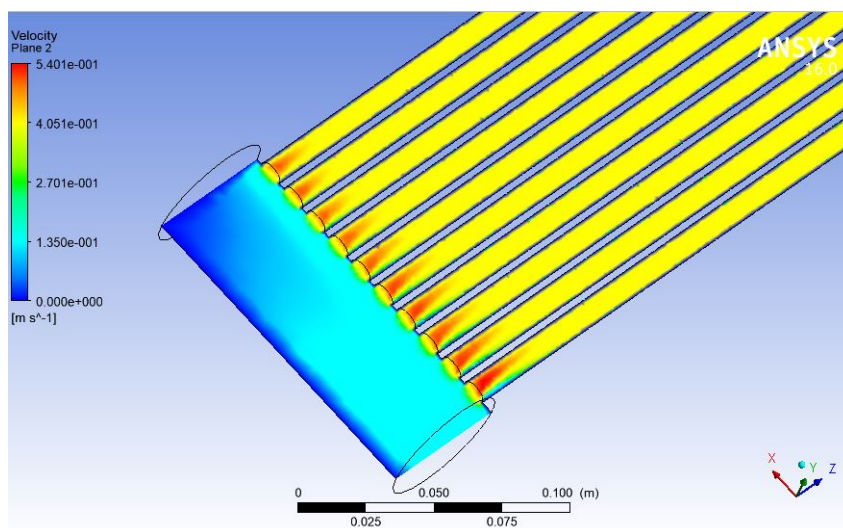


Figura 53 – Velocidade na entrada nos tubos coletores.

Fonte – Autor.

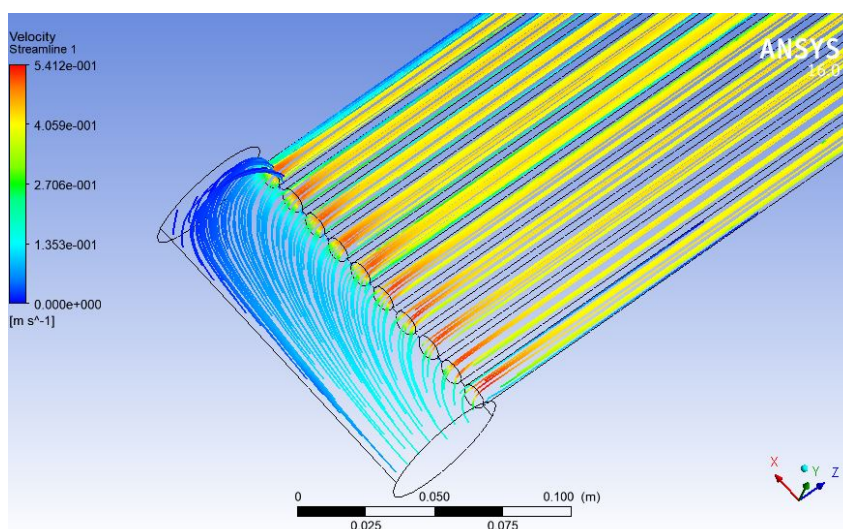


Figura 54 – Linhas de velocidade na entrada nos tubos coletores.

Fonte – Autor.

Nas figuras 55 e 56 representam a diminuição de velocidade do fluido saindo dos tubos dos coletores solares para a tubulação principal.

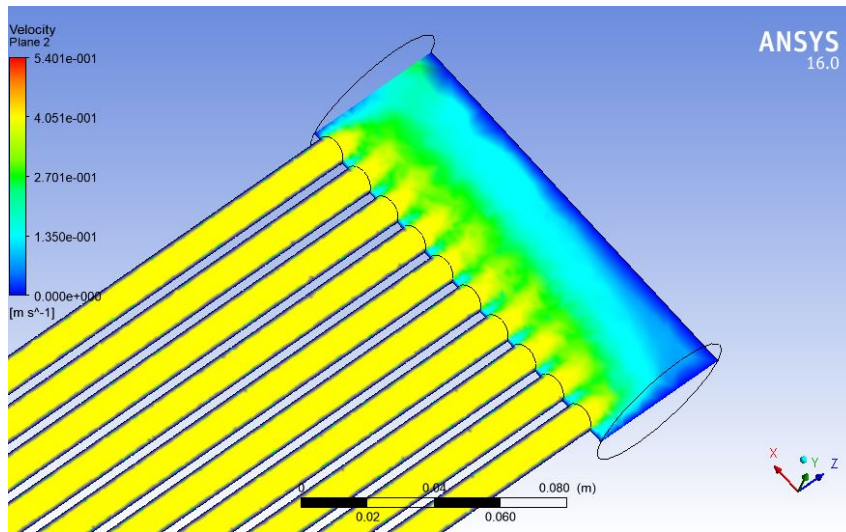


Figura 55 – Velocidade na saída nos tubos coletores.

Fonte – Autor.

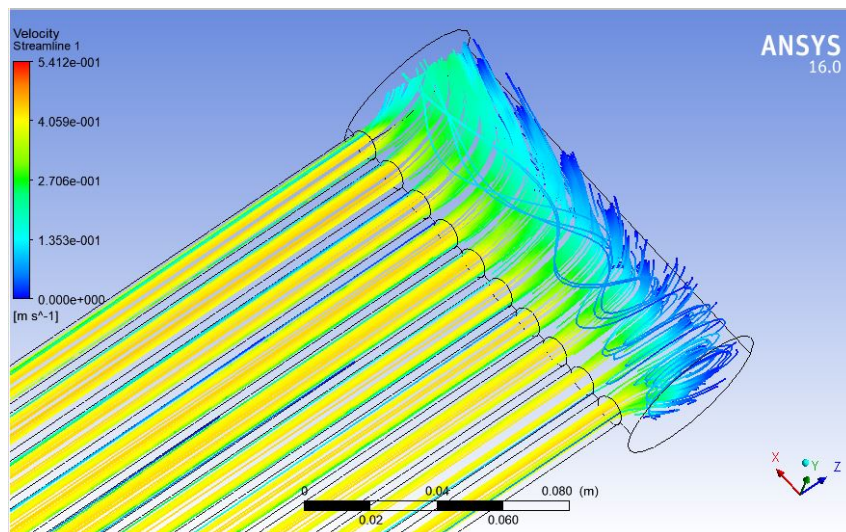


Figura 56 – Linhas de velocidade na saída nos tubos coletores.

Fonte – Autor.

Na Figura 57 representa o campo de velocidade do fluido no meio da tubulação do coletor solar, percebe-se que nas proximidades da parede a velocidade é bem próxima de zero e no centro do tubo a velocidade do fluido é a maior possível.

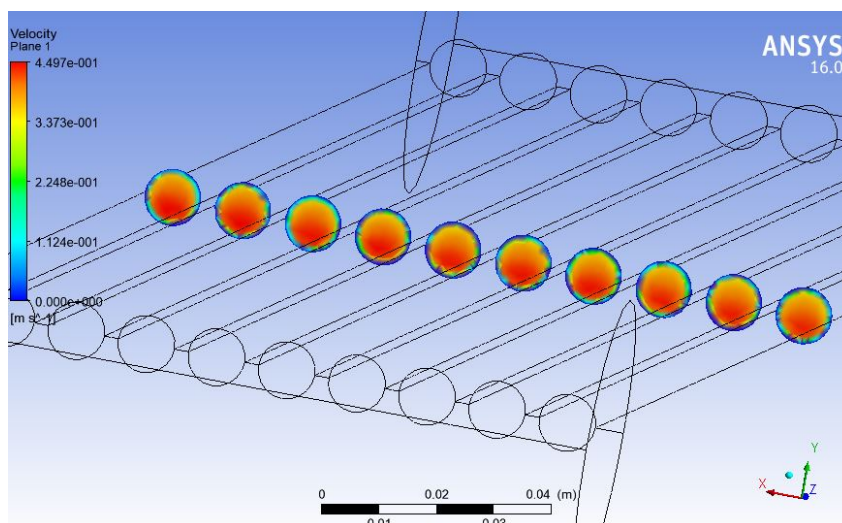


Figura 57 – Velocidade nos tubos coletores.

Fonte – Autor.

4.1.4 Perda de Carga

A tabela 2, juntamente com a Imagem 58 nos dá uma perspectiva do que está acontecendo com a velocidade no interior dos tubos, e conseqüentemente com a perda de carga, com o aumento da tubulação a velocidade não diminuiu, que seria o normal de se esperar, porém ela mantém algumas vezes o mesmo valor e em outras aumenta. Primeiro por causa da turbulência da saída do tubo principal para a entrada dos tubos dos coletores, e segundo que igual o catálogo sugere a perda de carga pode ser desconsiderada, pois quanto mais tubos, maior seria a perda de carga localizada e distribuída, e mais a velocidade iria diminuir com o aumento dos tubos, porém através da análise numérica mostrou que a velocidade se mantém, então a perda de carga pode ser desconsiderada e pode-se colocar vários coletores solares ligados que não irá prejudicar sua velocidade, e conseqüentemente, sua vazão, pois umas das preocupações deste trabalho era analisar como a perda de carga iria influenciar na velocidade/vazão quando fosse aumentando a quantidade de tubos existentes (placas).

Tabela 3 – Relação de tubo por velocidade.

TUBO	VELOCIDADE
1º	0,306099 m/s
2º	0,312335 m/s
3º	0,308604 m/s
4º	0,312719 m/s
5º	0,310463 m/s
6º	0,305725 m/s
7º	0,318168 m/s
8º	0,307375 m/s
9º	0,316531 m/s
10º	0,318281 m/s

Fonte: Autor.

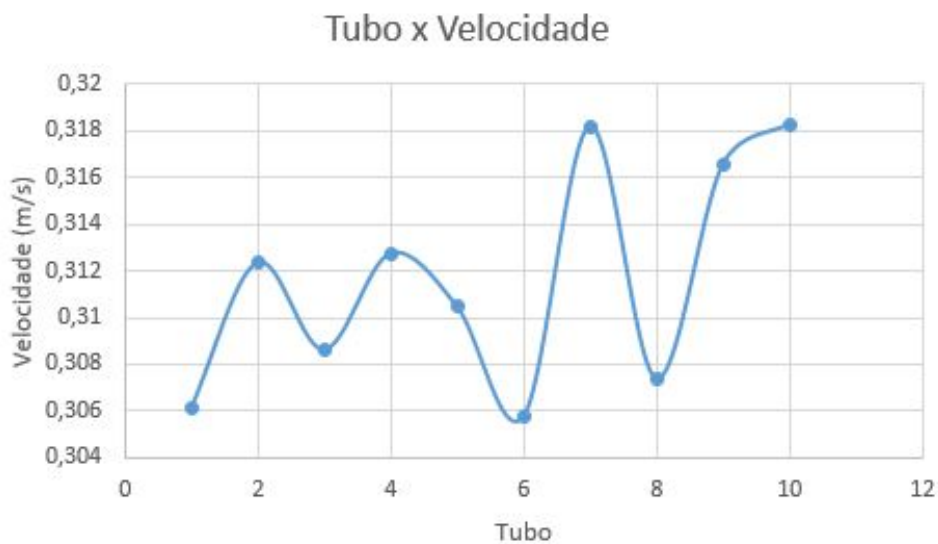


Figura 58 – Relação de tubo e velocidade.

Fonte – Autor.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

A simulação realizada nesse trabalho pode ser encarada como bem sucedida, pois tirou valores condizentes e que fazem sentido físico de temperatura, pressão, velocidade e perda de carga.

Este trabalho mostrou-se possível obter melhorias significativas em protótipos de coletores solares utilizando-se da simulação computacional, pois pode analisar todos os parâmetros importantes na construção da placa antes mesmo de construí-la e ver quais parâmetros quer possam ser alterado para melhorar a eficiência do coletor.

Um dado muito importante que foi tirado dessa análise, é que a perda de carga nos tubos dos coletores, são consideradas insignificantes pelos fabricantes e validadas pelas nossas análises computacionais, mostrando assim que pode-se colocar várias placas em série e paralelo que não irá atrapalhar sua vazão/velocidade, e conseqüentemente, a eficiência de aquecimento da piscina. Percebemos também, que a montagem está sendo feita de forma correta, pois quando se inverte a saída e coloca do mesmo lado que a tubulação de entrada a perda de carga se mostra relevante e não podendo colocar muitas placas em conjunto, porém como analisado, quando a entrada está do lado oposto da saída e perda de carga se torna insignificante, que atualmente é desse formato que é montado.

As maiores dificuldades encontradas para o projeto foram:

- Limite de 512 mil elementos da licença acadêmica, impediu de fazer uma análise de malha, ou seja, aumentar a quantidade de elementos e ver se a malha estaria ou não fazendo diferença no resultado final.

- Limite de processamento, quando foi o coletor solar original para ser analisado numericamente o computador não conseguiu processar o projeto, por isso foi diminuída a placa em 1/4 do valor original, que acaba induzindo a erros que não teria se fosse simulado com o original

- Dificuldade em diversidade nos dados dos catálogos, geralmente os fabricantes não fornecem muitos dados dos coletores solares, como diâmetros dos tubos dos coletores, pressão de trabalho, perda de carga.

Ao final do presente trabalho, pode-se concluir que o coletor solar dimensionado será eficiente e capaz de prover o aquecimento da piscina escolhida, pois apenas 1 coletor conseguiu elevar quase 0,3 K, então em um regime completo (com a piscina) funcionaria sem problemas.

Entre as possíveis sugestões para prosseguimento do estudo, destacam-se analisar a melhor disposição geométrica dos coletores solares para aquecimento de água de piscinas,

rearranjando sua disposição para gerar uma melhor eficiência na captação de energia solar e gerando uma mais rápida elevação na temperatura e controle da mesma, e fazer um estudo mais complexo analisando não só os coletores solares, mas também o próprio reservatório térmico, que seria a piscina, analisar em quanto tempo a piscina elevaria a sua temperatura à uma temperatura desejada, analisar melhor as perdas de calor que acontecem na piscina e como influenciam nos cálculos dos coletores e, por fim, analisar a melhor otimização de absorção de calor pela perda de carga.

6 REFERÊNCIAS

HELIOTEK Bosch Group. Disponível em: <<http://heliotek.com.br>. Acesso em 18 jan. 2018.

OLIVEIRA, L. F. C. de. et al. Potencial de redução do consumo de energia elétrica pela utilização de aquecedores solares no estado de Goiás. Eng. Agríc., Jaboticabal, 2008.

CORRÊA, Caroline. Dimensionamento de sistema de energia solar para aquecimento. Disponível em: <[http://maisengenharia.altoqi.com.br/hidrossanitario/dimensionamento-de-sistema-de-energia-solar-para-aquecimento/.](http://maisengenharia.altoqi.com.br/hidrossanitario/dimensionamento-de-sistema-de-energia-solar-para-aquecimento/)>. Acesso em: 11 maio 2017.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água – coletores solares - edição 04/15. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ColetoresSolares-banho.pdf>>. Acesso em: 05 Out. 2017. INMETRO, 2015.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água – coletores solares – reservatórios de baixa pressão – edição 05/14. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ColetoresSolares-bp.pdf>>. Acesso em: 05 Jun. 2017. INMETRO, 2014^a.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água – coletores solares – reservatórios de alta pressão – edição 02/14. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ColetoresSolares-ap.pdf>>. Acesso em: 05 Jun. 2017. INMETRO, 2014^b.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Tabela de classificação de sistemas de aquecimento solar de água – Coletores Solares. Disponível em: <<http://inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ColetoresSolares-banho.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2017.

PEREIRA, E. M. D; SOUZA, S. V. de; SILVA, S. M. da. Aquecimento Solar : panorama da evolução do mercado. In: VASCONCELLOS, Luiz Eduardo Menandro de; LIMBERGER, Marcos Alexandre Couto (Org.). Energia Solar para aquecimento de água

no Brasil: Contribuições da Eletrobrás, Procel e Parceiros. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2012. p 17-26.

PEREIRA, E. M. D; SOUZA. Aquecimento solar como medida de eficiência energética. In: VASCONCELLOS, Luiz Eduardo Menandro de; LIMBERGER, Marcos Alexandre Couto (Org.). Energia Solar para aquecimento de água no Brasil: Contribuições da Eletrobrás, Procel e Parceiros. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2012. p 71-76.

SOUZA, R. C; SALVADOR, E; LOMELINO, M. V. Aquecimento de água para banho. In: VASCONCELLOS, Luiz Eduardo Menandro de; LIMBERGER, Marcos Alexandre Couto (Org.). Energia Solar para aquecimento de água no Brasil: Contribuições da Eletrobrás, Procel e Parceiros. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2012. p 27-34.

Sociedade do sol: Manual de Manufatura e Instalação Experimental do ASBC (Aquecedor Solar de Baixo Custo). Disponível em: <<http://www.sociedadedosol.org.br>>. Acesso em: 05 de janeiro de 2012.

COSTA, EURIDES RAMOS. Limitações no uso de coletores solares sem cobertura para sistemas domésticos de aquecimento de água. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SOUZA, KARINA TERRA DE; LÁILY DE SOUZA, MIRANDA; SILVIA, MÁRCIA ALMEIDA. Aquecimento de água através do uso de coletores planos. Disponível em <<http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/indez.php/BolsistaDeValor/article/viewFile/1792/970>>. Acesso em: 02 fev 2018.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An introduction to Computational Fluid Dynamics. 1. ed. Harlow: Longman Scientific and Technical, 1995.