



UFOP

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



WAGNER SILVA FARIAS

**ESTUDO DE UM TROCADOR DE CALOR SOLO-AR
PARA RESFRIAMENTO DE AMBIENTES**

**OURO PRETO – MG
2021**

WAGNER SILVA FARIAS
fariaswagner@hotmail.com

ESTUDO DE UM TROCADOR DE CALOR SOLO-AR PARA RESFRIAMENTO DE AMBIENTES

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Luís Antônio Bortolaia

OURO PRETO – MG
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F224e Farias, Wagner Silva.

Estudo de um trocador de calor Solo-Ar para resfriamento de ambientes. [manuscrito] / Wagner Silva Farias. - 2021.
39 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Luís Antônio Bortolaia.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Transferência de calor. 2. Trocadores de calor. 3. Ambientes construídos - Resfriamento. I. Bortolaia, Luís Antônio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 536.24

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Wagner Silva Farias

Estudo de um trocador de calor solo-ar para resfriamento de ambientes

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 12 de Agosto de 2021

Membros da banca

DSc. Luís Antônio Bortolaia - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Ana Maura Araújo Rocha (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Edson Alves Figueira Junior (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luís Antônio Bortolaia , orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/08/2021



Documento assinado eletronicamente por **Luis Antonio Bortolaia, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/08/2021, às 16:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0212505** e o código CRC **2F86CBBC**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008777/2021-42

SEI nº 0212505

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha mãe, meus irmãos e a toda minha família pelo apoio e carinho ao longo desta jornada.

A Deus por toda força e coragem para alcançar minha meta.

Aos meus professores e orientadores pela sabedoria, conhecimento adquirido e experiências compartilhadas durante o curso.

Aos amigos e colegas de curso que batalharam, lado a lado, em busca dessa conquista.

A todos que, ao longo desses anos de curso, participaram, incentivaram e contribuíram para minha formação acadêmica.

O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar com mais inteligência.

Henry Ford

RESUMO

FARIAS, Wagner Silva: **Estudo de um trocador de calor solo-ar para resfriamento de ambientes**, 2021. (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Ouro Preto.

Este estudo foi realizado frente ao desafio de dimensionar um trocador de calor Solo-Ar, para resfriamento de ambientes. Atualmente a dependência de energia é crescente, seja esta, para o trabalho, conforto, lazer ou segurança. A busca de formas alternativas para reduzir o consumo energético é tendência mundial, seja economicamente, ou por motivos ambientais. O desenvolvimento de equipamentos como o trocador de calor Solo-Ar para substituição do aparelho de ar condicionado convencional é de grande relevância devido ao seu baixo consumo de energia, quando comparado aos sistemas convencionais mais utilizados. O presente trabalho tem como objetivo dimensionar um trocador de calor Solo-Ar para o resfriamento do ar de ambientes. Assim, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o comportamento do solo como reservatório inercial de energia, os tipos de trocadores de calor e suas classificações, os conceitos básicos de transferência de calor e o equacionamento para os cálculos do trocador de calor. A metodologia possui caráter experimental, na qual foi aplicado e avaliado diferentes diâmetros e temperaturas de saída do trocador de calor, para análise quantitativa do seu comportamento. Esses parâmetros foram analisados em duas configurações diferentes de trocador de calor, de tubos em série e em paralelo. As áreas de trocas térmicas, comprimento, perda de carga, eficácia, coeficiente de convecção e número de unidades de transferência (NTU) foram comparadas nas duas configurações de trocador de calor supracitadas. Os resultados mostraram que o aumento do diâmetro do tubo do trocador de calor manteve constante a eficácia e o NTU; aumentou a área de troca térmica e o comprimento do tubo do trocador de calor, enquanto reduziu a perda de carga e o coeficiente de transferência de calor por convecção. Por outro lado, o aumento da temperatura de saída do trocador de calor provocou redução da eficácia, do NTU, da área de troca térmica, do comprimento do tubo e da perda de carga do trocador de calor, enquanto o coeficiente de convecção permaneceu constante para ambas as configurações.

Palavras-chave: trocador de calor, transferência de calor, Solo-Ar.

ABSTRACT

FARIAS, Wagner Silva: **Study of an earth-air heat exchanger for *environment cooling*, 2021. (Graduate in Mechanical Engineering)**. Federal University of Ouro Preto.

This study was carried out facing the challenge of designing an earth-air heat exchanger for cooling residential environments. Currently, energy dependence is growing regarding work, comfort, leisure and security. The search for alternative ways to reduce energy consumption is a global trend, due economic and environmental reasons. The development of equipment such as the earth-air heat exchanger to replace the conventional air conditioner is extremely important due its low energy consumption as compared to the most used conventional systems. The present study aims to design an earth-air heat exchanger for environment cooling. Thus, a literature review was performed regarding behavior of the soil as an inertial energy reservoir, the types of heat exchangers and their classifications, the basic concepts of heat transfer and the equation for the heat exchanger calculations. The methodology presents an experimental character, in which different diameters and heat exchanger exit temperatures were applied and evaluated to quantitatively analyse its behavior. These parameters were analysed in two different configurations of heat exchanger, tubes in series and in parallel. The areas of heat exchange, tube length, pressure drop, efficiency, convection coefficient and number of transfer units (NTU) were compared in those two aforementioned heat exchanger configurations. The results showed that the increase of heat exchanger tube diameter kept the efficiency and NTU constant; increased the heat transfer area and tube length of the heat exchanger, while reduced the pressure drop and the convection heat transfer coefficient. On the other hand, the increase in the heat exchanger exit temperature caused a reduction in the efficiency, NTU, heat transfer area, tube length and pressure drop of the heat exchanger, while the convection coefficient remained constant for both configurations.

Keywords: heat exchanger, heat transfer, earth-air.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Trocador de calor duplo tubo	5
Figura 2 Trocador de calor casco-tubos.....	7
Figura 3 Trocador de calor tipo placas	8
Figura 4 Trocador de calor com placas em espiral	9
Figura 5 Trocador de calor Solo-Ar.....	11
Figura 6 Trocador de calor na configuração de tubos paralelos	24
Figura 7 Trocador de calor configuração de tubos em série.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Variáveis e indicadores	21
Tabela 2 Dados de entrada para o cálculo do trocador de calor	24
Tabela 3 Resultados para o trocador de calor em paralelo	25
Tabela 4 Cálculos em função do diâmetro do tubo, para a temperatura de 21°C.....	28
Tabela 5 Dados iniciais para trocador de calor em série	30
Tabela 6 Cálculos em função do diâmetro do tubo, para o trocador de calor em Série	30
Tabela 7 Cálculos em função do diâmetro do tubo, para o trocador de calor em Série	33
Tabela 8 Resultados após variação da temperatura em 1°C	34
Tabela 9 Potência hidráulica para cada situação analisada	35

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Área de troca térmica em função do diâmetro do tubo	25
Gráfico 2. Comprimento do tubo em função do diâmetro	26
Gráfico 3 Perda de carga em função do diâmetro do tubo	26
Gráfico 4 Perda de carga em função do diâmetro do tubo	27
Gráfico 5 Coeficiente de convecção em função do diâmetro do tubo	27
Gráfico 6 Área de troca térmica em função do diâmetro do tubo	31
Gráfico 7 comprimento do tubo em função do diâmetro do tubo.....	31
Gráfico 8 Perda de carga em função do diâmetro do tubo	32
Gráfico 9 Perda de carga em função do diâmetro do tubo	32

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{m}_{ar}	Vazão mássica do ar (kg/s)
$T_{ar,e}$	Temperatura do ar de entrada (°C)
$T_{ar,s}$	Temperatura do ar que sai do trocador (°C)
T_{solo}	Temperatura do solo (°C)
D	Diâmetro do tubo (m)
L	Comprimento do tubo (m)
n	Número de tubos em paralelo no trocador de calor (un)
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor (W)
$C_{p,ar}$	Calor específico (J/(kg.K))
h	Coefficiente de troca de calor por convecção (W/m ² K)
A	Área de troca térmica (m ²)
ΔT_{lm}	Diferença de temperatura média logarítmica (°C)
ε	Eficácia
NTU	Número de unidades de transferência
Nu	Número de Nusselt
Re	Número de Reynolds
ρ	Massa específica (kg/m ³)
ν	Viscosidade cinemática (m ² /s)
V	Velocidade de escoamento do fluido (m/s)
\dot{V}	Vazão volumétrica (m ³ /s)
ξ	Fator de atrito
ΔP_L	Perda de carga localizada (Pa)
K	Coefficiente de perda de carga singular

Δp	Perda de carga (Pa)
P_h	Potência hidráulica (W)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
H	Altura (m)
λ	Condutividade térmica do ar (W/m.K).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	2
1.3.1	Geral	2
1.3.2	Específicos.....	2
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Comportamento térmico do solo	4
2.2	Trocadores de calor	4
2.2.1	Trocador duplo tubo	5
2.2.2	Trocador de calor casco e tubo	6
2.2.3	Trocador de calor de placas	7
2.2.4	Trocadores de calor compactos	10
2.3	Trocador de calor solo-Ar.....	11
2.4	Equacionamento	12
3	METODOLOGIA	18
3.1	Tipo de Pesquisa.....	18
3.2	Materiais e Métodos	19
3.3	Variáveis e Indicadores	20
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	21
3.5	Tabulação de Dados.....	21
3.6	Considerações Finais do Capítulo	22
4	RESULTADOS	23
4.1	Dados iniciais para o cálculo	23
4.2	Análise do trocador de calor na configuração em paralelo	24
4.3	Análise do trocador em paralelo com o aumento da temperatura de saída	28
4.4	Análise do trocador de calor na configuração em série	29
4.5	Análise do trocador em série com aumento da temperatura de saída.....	33
4.6	Potência hidráulica	34
5	CONCLUSOES E RECOMENDAÇÕES	36

5.1	Conclusões.....	36
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	37
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA		38

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Alves (2017) aborda que nos ambientes de trabalho, um fator extremamente importante, para o organismo humano é o conforto térmico, visto que o corpo humano funciona como uma máquina térmica que produz calor segundo a sua atividade, necessitando liberar calor em quantidade suficiente para manter a sua temperatura interna na ordem de 37°C. Quando as trocas térmicas entre o organismo e o meio ambiente ocorrem sem maior esforço, o corpo humano tem uma sensação de conforto térmico e a sua produtividade, sob este ponto de vista, é máxima.

Nascimento e Alves (2016) abordam que o desenvolvimento da humanidade, ao longo de muitos anos, garantiu melhores índices de conforto e longevidade devido aos avanços tecnológicos. O aumento populacional, também aumenta a procura por mais recursos energéticos, causando impactos ambientais que vêm sendo discutidos mundialmente, mediante a conscientização da gravidade da questão. Nesse sentido, a crescente preocupação com as questões ambientais e a conscientização mundial sobre a promoção do desenvolvimento em bases sustentáveis vêm estimulando a realização de pesquisas de desenvolvimento tecnológico que visam a incorporação dessas tecnologias e a consequente redução dos custos e impactos na sua geração.

Freitas e Dathein (2013) expõem que, mundialmente, a fonte energética mais utilizada para a produção de energia elétrica é proveniente de fontes fósseis e não renováveis como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural. As grandes dependências de fontes não renováveis de energia têm acarretado, além da preocupação permanente com o seu esgotamento, a emissão de gases tóxicos e poluentes e material particulado. Dos gases liberados para a atmosfera, os mais preocupantes são os “gases do efeito estufa”, destacando-se o dióxido de carbono.

Estima-se que o consumo de energia elétrica devido aos condicionadores de ar no setor residencial tenha mais que triplicado nos últimos 12 anos, atingindo 18,7 TWh em 2017. A posse de equipamentos nas residências aumentou 9,0% ao ano entre 2005 e 2017 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA 2018, p. 01).

Conforme VAZ (2016) o Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA) é um dispositivo, constituído por um ou mais dutos enterrados no solo, capaz de aproveitar a energia térmica presente na camada superficial do solo (subsolo), o qual pode absorver (em períodos quentes) ou ceder (em períodos frios) calor para o ar que escoar no interior dos dutos, geralmente movido pela ação de ventiladores. Dessa forma, pode ser utilizado para promover a melhoria na condição térmica no interior de edificações por meio da redução do consumo de energia elétrica

de equipamentos de ar condicionado tradicionalmente utilizados, aproveitando a energia solar absorvida pelas camadas superficiais do solo (subsolo). O princípio de funcionamento está embasado em transferir calor do solo para o ar em períodos frios e ceder calor do ar para o solo em períodos quentes. Com isso, é possível oferecer uma melhoria na condição térmica de ambientes construídos, objetivando diminuir o consumo de energia elétrica.

Diante da crescente demanda energética atual, focando-se nas projeções futuras com relação ao consumo de energia elétrica que é indispensável para o desenvolvimento de qualquer país, tem-se o seguinte desafio:

Como dimensionar um trocador de calor Solo-Ar para resfriamento de ambientes?

1.2 Justificativa

Atualmente depende-se de energia para quase tudo, seja trabalho, conforto, lazer ou segurança, existe uma infinidade de aparelhos e serviços que não funcionam sem energia. A busca de formas alternativas para reduzir o consumo energético ocorre mundialmente, seja motivado economicamente, ou por motivos ambientais. Apesar da energia hidrelétrica ser considerada uma fonte de energia limpa, essas usinas, ainda assim, trazem consequências negativas para o meio ambiente, e em muitos casos, a construção de hidrelétricas pode destruir o habitat de animais em extinção, ou animais que só são encontrados naquela região do país.

O desenvolvimento de equipamentos como o trocador de calor Solo-Ar para substituição do aparelho de ar-condicionado convencional é um tema de pesquisa de grande relevância, devido ao seu baixo consumo de energia, quando comparado aos sistemas convencionais mais utilizados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Dimensionar um trocador de calor Solo-Ar para o resfriamento do ar de ambientes.

1.3.2 Específicos

- Realizar pesquisa bibliográfica sobre trocadores de calor e trocadores de calor Solo-Ar;
- Desenvolver o equacionamento matemático para o dimensionamento de um trocador de calor Solo-Ar;

- Apresentar o cálculo do trocador de calor Solo-Ar em um estudo de caso de resfriamento de ar para aplicação residencial.
- Propor uma configuração mais eficiente e econômica para um trocador de calor Solo-Ar para o resfriamento de um ambiente residencial.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos que foram organizados da seguinte forma:

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e os objetivos, geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação dos conceitos e teoria a respeito do funcionamento e dimensionamento de um trocador de calor Solo-Ar, e sua aplicação para a refrigeração de ar de ambientes residenciais.

O terceiro capítulo apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa, bem como, as ferramentas utilizadas para a coleta de dados, que são partes essenciais na obtenção dos resultados.

No quarto capítulo são relatadas as discussões e resultados encontrados, a partir da coleta de dados.

O quinto capítulo encerra o trabalho com as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo é apresentada a fundamentação teórica referente ao comportamento do solo como reservatório inercial de energia. Em um segundo momento será apresentado os tipos de trocadores de calor e os tipos de classificações possíveis referentes ao trocador de calor do tipo casco e tubos. Em seguida, são apresentados os conceitos básicos de transferência de calor, comentando de forma geral sobre os principais aspectos. Por fim, serão apresentados os métodos utilizados em cálculos de trocadores de calor.

2.1 Comportamento térmico do solo

A crosta terrestre possui inércia térmica, com a radiação solar incidindo em sua superfície, energia é armazenada em forma de calor em seu interior, sendo que nos períodos de inverno em que a temperatura é mais fria, esse calor é liberado, e o oposto ocorre no verão. (VAZ apud BRUM & ROCHA, 2015).

Gasparim *et al.* (2005) abordam que é a partir da quantidade de radiação solar absorvida e perdida que a camada superficial do solo se aquece ou se resfria no decorrer do dia e do ano, em resposta a tais fatores, gerando variações térmicas nas camadas mais próximas da superfície. Pelo fato da absorção e da perda de energia ocorrer na superfície, aliado à baixa velocidade de propagação do calor no interior do solo, as variações térmicas se limitam aos horizontes mais superficiais.

Vaz (2011) observa que em períodos frios, o subsolo não apresenta temperaturas tão baixas, e em períodos quentes, o subsolo é mais ameno e estabilizado, se comparado com a variação climática que ocorre com o ambiente externo. Essa característica tem sido uma alternativa para o pré-aquecimento de ambientes, no inverno, e para o resfriamento de ambientes no verão.

2.2 Trocadores de calor

Trocadores de calor são equipamentos vastamente utilizados pelas indústrias em geral e são responsáveis por fazer com que ocorra a troca térmica entre duas substâncias. A força motriz responsável pela troca de calor é a diferença de temperatura entre dois meios. Dessa forma, pode-se dizer que estes aparelhos trabalham sempre com dois materiais, geralmente fluidos, em diferentes temperaturas.

Existem diversos modelos e tipos de trocadores de calor trabalhando com fluidos variados e em diversas faixas de temperatura e pressão. Sua seleção leva em consideração, além destas variáveis, a eficiência de troca térmica, a perda de carga, o peso, dimensões, etc.

Saunders apud Araújo (2002) classifica os trocadores de calor em quatro categorias:

- Tubular: casco e tubo, duplo tubo, resfriadores a ar, tubo aquecido;
- De placa: placa, espiral, lamela, placa aletada;
- De materiais altamente resistentes à corrosão: grafite, vidro, teflon;
- Especiais: rotativos, elétricos.

Entre os principais tipos de trocadores de calor, em termos de sua geometria, destacam-se:

- Duplo tubo (double pipe);
- Casco e tubo (shell and tube);
- Placas (plate);
- Outros: trocadores compactos, resfriadores a ar (air-cooled), variações do casco e tubo etc.

2.2.1 Trocador duplo tubo

O trocador de calor duplo tubo é composto por dois tubos concêntricos, geralmente com dois trechos retos e com conexões apropriadas nas extremidades de cada tubo, para dirigir os fluidos de uma seção reta para outra. Esse conjunto com forma de U é denominado grampo (hairpin). O tubo interno pode ser liso ou aletado. O tubo aletado, com aletas externas longitudinais, é indicado quando o fluido que escoar pelo espaço anular apresenta coeficiente de transferência de calor por convecção muito baixo, cerca de menos da metade do outro coeficiente. A aleta aumenta a área de troca de calor. A Figura 1 ilustra o trocador de calor de calor duplo tubo.

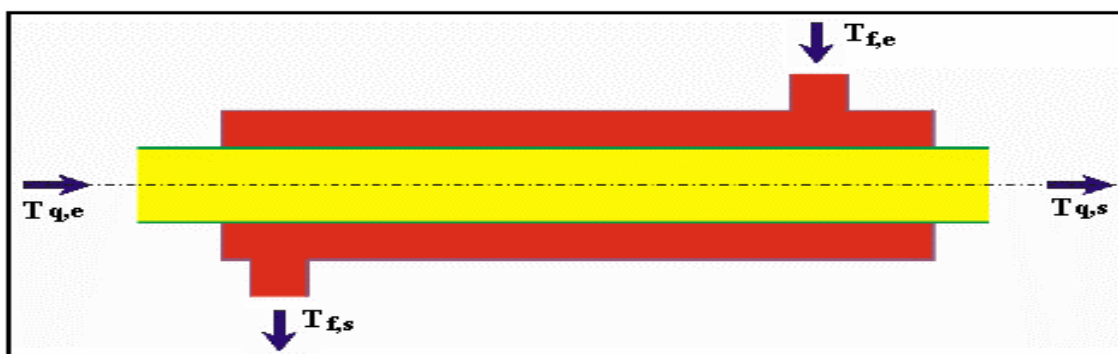


Figura 1 Trocador de calor duplo tubo

Fonte: <http://www.ufjf.br>

As principais vantagens desse tipo de trocador são: facilidade de construção e de montagem, ampliação de área, ou seja, pode ser instalada área adicional em uma unidade já existente, e facilidade de manutenção, pode-se ter fácil acesso para limpeza em ambos os lados de escoamento, dependendo das conexões das extremidades. Os fluidos podem operar em contracorrente ou em paralelo. Em contracorrente, os dois fluidos percorrem o trocador em sentidos contrários, enquanto em paralelo percorrem no mesmo sentido. Esse tipo de trocador costuma ser economicamente viável quando são necessárias áreas de troca de até 30 m².

2.2.2 Trocador de calor casco e tubo

Araújo (2002) afirma que o trocador de calor casco e tubo é composto por um casco cilíndrico, contendo um conjunto de tubos, colocado paralelamente ao eixo longitudinal do casco. Os tubos são presos, em suas extremidades, a placas perfuradas denominadas espelhos, sendo que a cada furo corresponde um tubo do feixe. Os espelhos, por sua vez, são presos de alguma forma ao casco. Os tubos que compõem o feixe atravessam várias placas perfuradas, as chicanas, que servem para direcionar o fluido que escoar por fora dos tubos e também para suportar os tubos. Na realidade, o que se costuma chamar de feixe de tubos é o conjunto composto pelos tubos e chicanas. As chicanas são mantidas em posições fixas por meio dos espaçadores de chicanas. No trocador de calor casco e tubo, um dos fluidos escoará pelo interior dos tubos (fluido do lado tubo) e o outro por fora dos tubos (fluido do lado casco). O fluido do lado tubo entrará no trocador através de um bocal, onde terá acesso ao interior dos tubos passando pelos orifícios do espelho. Esse fluido percorrerá o trocador e sairá pelo bocal existente na outra extremidade do equipamento. O fluido do lado casco ingressará no trocador através de um dos bocais localizados no casco, será direcionado pelas chicanas para cruzar o feixe de tubos várias vezes ao longo de seu comprimento, saindo pelo outro bocal localizado na outra extremidade, como mostra a figura 2.

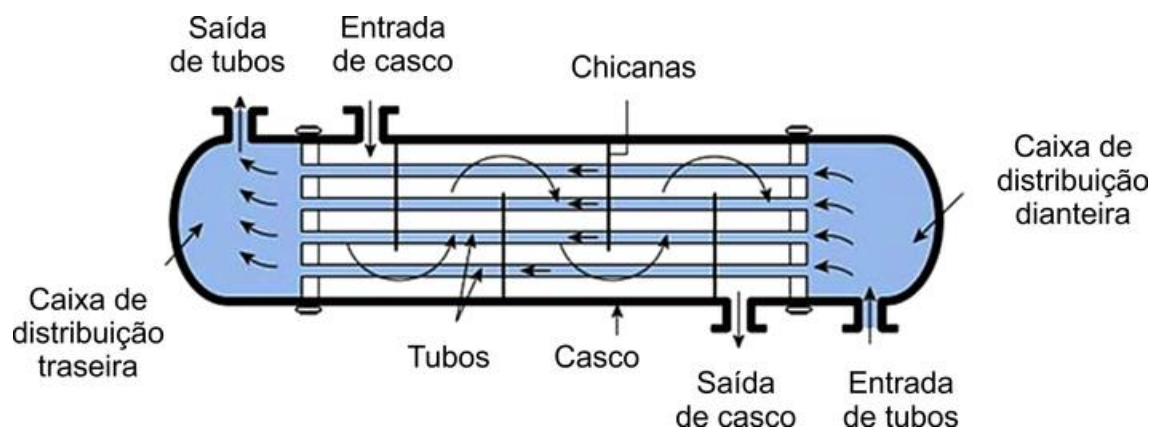


Figura 2 Trocador de calor casco-tubos

Fonte: <https://www.cdcequipamentos.com>

O trocador de calor casco e tubo é o mais comumente empregado na indústria química em razão de sua ampla faixa de uso. Pode ser projetado praticamente para qualquer aplicação. Pode ser utilizado para amplas faixas de vazão, temperatura e pressão. Normalmente, é o único tipo que pode ser aplicado a processos que necessitam de grandes áreas de troca de calor (5000 m²), pressões acima de 30 bar e temperaturas superiores a 260°C.

2.2.3 Trocador de calor de placas

Segundo Araújo (2002) o trocador de calor de placas consiste de um suporte onde placas independentes de metal, sustentadas por barras, são presas por compressão, entre uma extremidade móvel e outra fixa. Entre placas adjacentes formam-se canais por onde os fluidos escoam. A troca de calor se dá através de cada placa, de um lado tem-se o fluido frio e do outro, o quente. Os trocadores de placa foram introduzidos em 1930 na indústria de alimentos em razão da facilidade de limpeza, mas projetos preliminares já haviam surgido muitos anos antes. A partir da década de 60 houve grande impulso e desenvolvimento ampliando sua faixa operacional. Atualmente, ele compete em setores que, historicamente, utilizam outros tipos de trocadores. As placas são feitas por prensagem e apresentam superfície com corrugações, as quais fornecem maior resistência à placa e causam maior turbulência aos fluidos em escoamento. Podem ser feitas de qualquer material que possa ser prensado. Normalmente, são utilizados materiais nobres como aço inox, titânio, ligas titânio-paládio, Incoloy 825, Hastbloy, Inconel 625, Diabon F, entre outros. O mais utilizado é o aço inoxidável 316. Um trocador de placas é mostrado na figura 3.

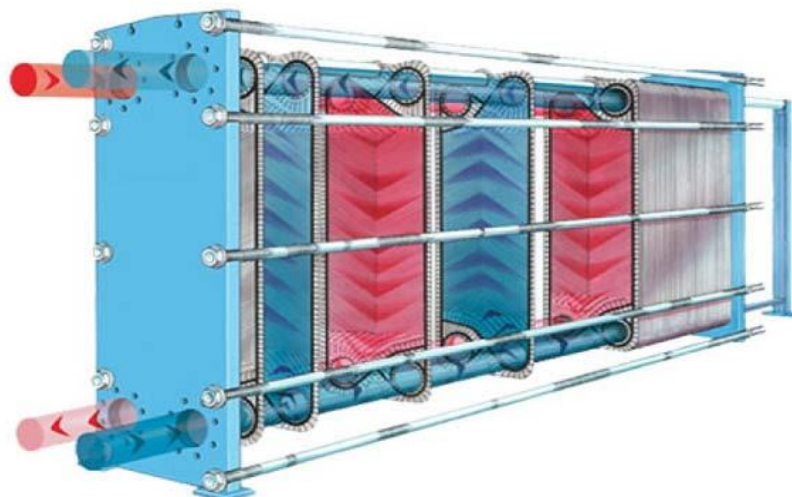


Figura 3 Trocador de calor tipo placas

Fonte: <http://braskor.com.br>

De acordo com Côrte (2014) a configuração de um trocador a placas define a distribuição das correntes quente e fria ao longo dos seus canais. Esta configuração é definida pelo seu número de canais, pelos números de passes em cada lado e pelas localizações dos fluidos e das conexões de alimentação. São exemplos de configurações, o arranjo em paralelo, onde uma corrente pode ser dividida entre os canais para realizar apenas um passe pelo trocador e o arranjo em série, que realiza diversos passes no trocador. Normalmente os arranjos em paralelo e em série são empregados para altas e baixas vazões, respectivamente. A velocidade de escoamento nos canais está diretamente relacionada à quantidade de canais por passe. Quanto menor o número de canais de escoamento por passe, maior a velocidade e a perda de carga. Na grande maioria dos trocadores a placas, o fluxo é contracorrente. Esses trocadores permitem a utilização de diversos tipos de fluidos, inclusive com maior viscosidade. As principais características e vantagens dos trocadores a placas são a grande superfície de transferência de calor, o fato de serem leves e compactos, a versatilidade de aplicação, facilidade de limpeza e manutenção, alto rendimento térmico e bom controle de temperatura. Como desvantagem, possui limitações de pressão e temperatura de operação pelo uso de gaxetas e possui alta perda de carga, devido aos estreitos canais corrugados por onde os fluidos escoam. Atualmente são muito utilizados em locais confinados ou sensíveis ao peso, tais como, a bordo de navios e plataformas de produção de petróleo.

Com base em Kakaç e Liu (2002) trocadores de calor helicoidais e espirais são trocadores compostos por tubos enrolados em formato helicoidal ou espiral, montados dentro de um casco. O coeficiente de transferência térmica é maior nesse tipo de trocador de calor do que em trocadores com tubos retos. Como mostrado na figura 4.

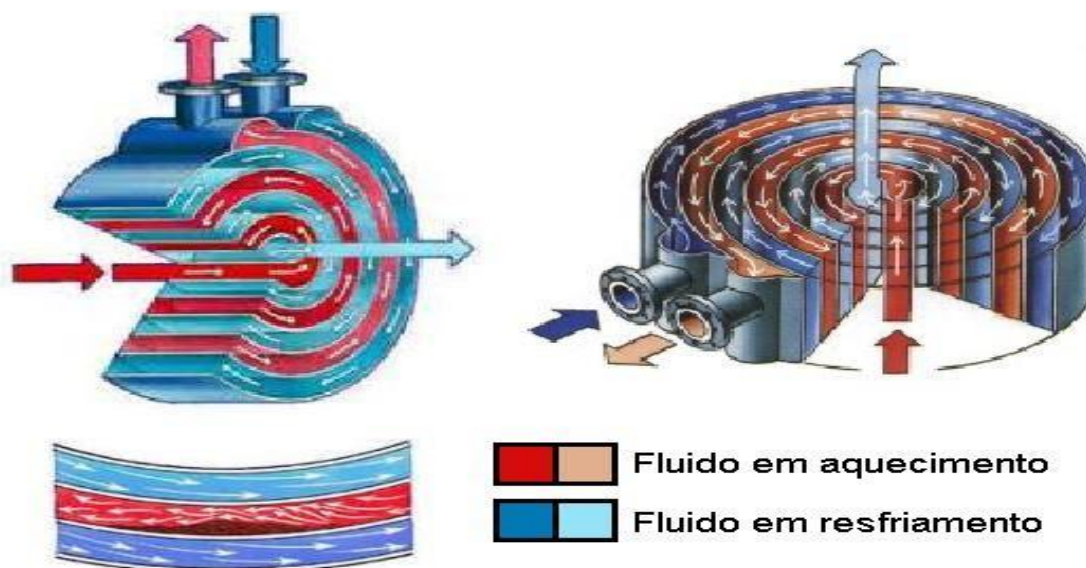


Figura 4 Trocador de calor com placas em espiral

Fonte: <https://sites.google.com>

Araújo (2002) aborda que o trocador de calor espiral foi desenvolvido na década de 1930 para a indústria de papel em substituição aos casco-tubos, pois estes entupiam frequentemente, entretanto, seu uso não foi expandido para outras indústrias. São equipamentos bastante compactos, porém, relativamente caros, e considerados eficientes, pois apresentam boas características de transferência de calor e ocupam pequeno espaço físico. Podem trabalhar com aproximações (“approach”) de temperatura de 3°F. São considerados um tipo de trocador de placas. O trocador de calor espiral consiste de duas placas de metal enroladas em espiral, com espaço entre elas. Os fluidos são separados por uma superfície curva, que causa turbulência e dificulta a formação de incrustação.

Costuma ser construído em três tipos principais que diferem quanto às conexões e ao arranjo de escoamento.

O tipo I possui tampas planas sobre os canais. O escoamento é em contracorrente com conexões no centro e na periferia. Uma corrente entra no centro da unidade e esco para a parte externa, enquanto a outra entra na periferia e caminha para o centro. E utilizado em operações com líquidos, condensação ou resfriamento de gases. Quando opera com sólidos, a montagem é horizontal, quando opera com vapor utiliza-se montagem vertical.

O tipo II é projetado para escoamento em fluxo cruzado. Um canal é completamente selado nas partes de cima e de baixo, enquanto o outro é aberto nas partes superior e inferior. Dessa forma, um dos fluidos esco pelo canal espiral e o outro, em fluxo cruzado. Esse tipo é

muito utilizado como condensador de superfície em plantas de evaporação (o vapor escoar pelo canal aberto).

O tipo III pode desempenhar quatro tarefas no mesmo equipamento, na condensação de misturas de vapor superaquecido e de gases incondensáveis. Resfria o vapor superaquecido, condensa, resfria o condensado e resfria os não condensáveis. O fluido refrigerante flui da periferia para o centro. O vapor entra pela parte superior, onde é distribuído pelos canais abertos.

2.2.4 Trocadores de calor compactos

Segundo Souza (2015) os desenvolvimentos da engenharia térmica permitiram que fosse desenvolvida toda uma série de trocadores de calor adaptados para os mais diversos tipos de aplicações industriais. Embora esses avanços tenham garantido o pleno conhecimento do comportamento e criação de relações que permitiram que vários modelos desses difusores de calor pudessem ser utilizados na prática com eficiência. Algumas áreas de utilização exigem que, além da eficiência no comportamento térmico, esses equipamentos passassem a ter como premissas de projeto, a miniaturização de seu volume.

QI LI *et al*, apud Souza (2015) classifica os trocadores de calor compactos em cinco tipos básicos, segundo a sua geometria:

- Placas: Normalmente tratados pela sigla PHE (Plate-Heat Exchanger), foram os primeiros trocadores compactos a surgirem. O primeiro dessa modalidade a ser patenteado tendo sido criado pelo Dr. Richard Seligman, foi utilizado para o processo de pasteurização de leite. São manufaturadas em ligas de alumínio ou aço inox mais comumente, mas sob certas aplicações mais específicas, são construídos com ligas de níquel ou titânio. Basicamente são construídos por placas que podem ser lisas ou corrugadas segundo padrões.
- Placa aletada: Nomeado pela sigla PFHE (Plate-Fin heat exchanger), foi utilizado a partir de 1910 na indústria automotiva em 1940 na aeronáutica. É constituído por chapas finas que passaram por um processo de estampagem formando ressaltos que atuam como aletas. As aletas, além de aumentarem a área de troca térmica, atuam fazendo com que o fluido tenha que percorrer um trajeto maior na camada, o que aumenta a quantidade de energia transferida e um possível acréscimo na eficiência.
- Trocadores tipo circuito impresso: De recente desenvolvimento, são nomeados pela sigla PCHE (Printed Circuit Heat Exchanger), tem diâmetros hidráulicos da ordem de 1 a 2 mm, placas de cerca de 1,6 mm e operam com grandes pressões e temperaturas, tendo razão de densidade de

área superior a $2500 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Tem esse nome pelo seu processo de fabricação, no qual cada camada é depositada uma sobre a outra, processo nomeado de *Diffusion Bonding*. Durante o processo de deposição, uma região da camada que formará o canal é omitida, de forma que depois de finalizado, o componente possui um série de canais ordenados.

2.3 Trocador de calor Solo-Ar

Rodrigues (2018), define que Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA) é um dispositivo constituído por um ou mais dutos enterrados no solo, através dos quais o ar flui movido pela ação de ventiladores. Esse dispositivo é capaz de aproveitar a energia térmica armazenada na camada superficial do solo, proveniente da incidência da radiação solar e, com isso, reduzir o consumo de energia elétrica dos equipamentos de condicionamento de ar tradicionalmente utilizados para a climatização de edificações, como mostrado na figura 5.

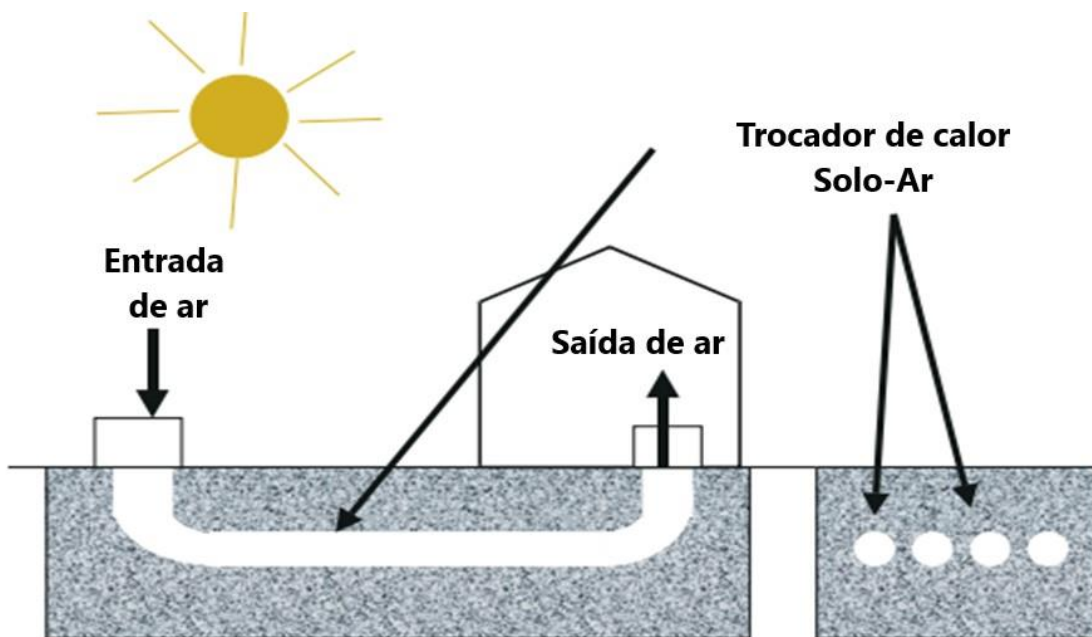


Figura 5 Trocador de calor Solo-Ar

Fonte: Adaptado de Janssens, A; Paepe, M; Design of earth-air heat exchangers A. p.1. 2003.

De acordo com Janssens e Paepe (2003), tubos são colocados no solo, através do qual o ar é extraído. Devido à alta inércia térmica do solo, as flutuações de temperatura na superfície do solo, expostas ao clima externo, são predominantes na superfície. Além disso, ocorre um intervalo de tempo entre as flutuações de temperatura no solo e na superfície. Portanto, a uma profundidade suficiente, a temperatura do solo é menor do que a temperatura do ar externo no verão e maior no inverno. Quando uma vazão de ar é puxada para os trocadores de calor Solo-Ar, o ar é, portanto, resfriado no verão e aquecido no inverno.

Seus princípios de operação baseiam-se na mecânica dos fluidos e transferência de calor, áreas onde a teoria *Construtal* tem sido usada para melhorar o desempenho, ou reduzir imperfeições, de vários sistemas térmicos, após uma estratégica análise de suas geometrias (ou de seu *design*), também chamada de método *Design Construtal* que se fundamenta na lei construtal, destaca (BRUM, 2016).

Vaz *et al* (2016), observaram que à medida que a configuração do arranjo de dutos foi se tornando mais complexa, ou seja, havendo um aumento na quantidade de dutos na instalação, se deu uma melhoria significativa no desempenho térmico do TCSA. Isso ocorre concomitantemente com a diminuição dos respectivos diâmetros dos dutos, mantendo constante neste processo a vazão total da instalação. Contudo os parâmetros importantes de projeto considerados são: número de tubos, tamanho dos tubos e comprimento dos tubos.

2.4 Equacionamento

O trocador de calor Solo-Ar deve ser dimensionado para atender a determinados requisitos de projeto. Por exemplo, durante o tempo frio o ar de ventilação na saída do trocador de calor Solo-Ar deve ser aquecido. Alternativamente, o ar que sai do trocador de calor Solo-Ar deve fornecer parte da carga de resfriamento para o edifício durante um dia de verão. Estes requisitos de projeto são alcançados aquecendo ou resfriando ar de ventilação no tubo enterrado a partir da temperatura do ar externo, em relação à temperatura do solo na vizinhança do tubo. Assim, pela natureza do problema de projeto, os seguintes parâmetros de dimensionamento do problema são especificados:

- \dot{m}_{ar} : vazão mássica do ar (kg/s);
- $T_{ar,e}$: temperatura do ar de entrada (°C);
- $T_{ar,s}$: temperatura do ar de saída desejada após o trocador de calor (°C);
- T_{solo} : temperatura do solo (°C).

Conforme Janssens e Paepe (2003), a vazão mássica do ar e a temperatura do ar de saída são definidos pelo requisito de projeto. A temperatura do ar de entrada e a temperatura do solo seguem as condições climáticas do projeto para o problema. A temperatura do solo é definida pelo clima externo e pela composição do solo, propriedades e umidade. A temperatura do solo flutua no tempo, mas a amplitude da flutuação diminui com o aumento da profundidade dos tubos, e mais fundo no chão a temperatura converge para um valor praticamente constante ao longo do ano. As profundidades ideais estão na faixa de dois a quatro metros.

Os parâmetros geométricos de dimensionamento de um trocador de calor Solo-Ar são:

- D: o diâmetro do tubo (m);
- L: o comprimento do tubo (m);
- n: o número de tubos em paralelo no trocador de calor, no caso de um trocador com uma configuração em paralelo.

Uma vez que o número de tubos é conhecido, o problema é reduzido a determinar o tamanho do tubo. O problema termo hidráulico é então limitado a 1 tubo, com uma taxa de fluxo de ar dada por:

$$\dot{m}_{Ar,tubo} = \frac{\dot{m}_{Ar,total}}{n} \quad (1)$$

O calor total transferido para o ar ou retirado do ar escoando através de um tubo enterrado pode ser escrito como:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ar} \cdot c_{p,ar} \cdot (T_{ar,s} - T_{ar,e}) \quad (2)$$

Onde:

\dot{Q} – é a taxa de transferência de calor (W);

$c_{p,ar}$ é o calor específico do ar (J/kg.K).

Devido à convecção entre a parede e o ar, o calor transferido também pode ser escrito como:

$$\dot{Q} = h A \Delta T_{lm} \quad (3)$$

Sendo:

h – coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m².K);

A – área de transferência de calor (m²);

ΔT_{lm} – diferença de temperatura média logarítmica (°C).

A diferença de temperatura média logarítmica, considerando $T_{solo} = T_{parede}$, é dada por,

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_{ar,s} - T_{ar,e}}{\ln \left(\frac{T_{ar,e} - T_{tubo}}{T_{ar,s} - T_{tubo}} \right)} \quad (4)$$

Se um tubo de comprimento infinito é usado, o ar será aquecido ou resfriado à temperatura da parede. Assim, a eficácia ε do trocador de calor Solo-Ar pode ser definida como:

$$\varepsilon = \frac{T_{ar,s} - T_{ar,e}}{T_{tubo} - T_{ar,e}} \quad (5)$$

A eficácia pode ainda ser escrita como:

$$\varepsilon = 1 - e^{(-hA/\dot{m}_{ar} c_{par})} \quad (6)$$

O grupo adimensional chamado de número de unidades de transferência (NTU) é comumente utilizado na análise de trocadores de calor. Ele é definido como:

$$NTU = \frac{hA}{\dot{m}_{ar} \cdot C_{par}} \quad (7)$$

Logo, a eficácia pode ser escrita:

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU} \quad (8)$$

A eficácia do trocador de calor pode, portanto, ser determinada pelo grupo adimensional NTU. Aumentar o NTU possibilita o aumento da eficácia, embora, depois de $NTU > 3$, o ganho relativo ser pequeno. Existem várias maneiras de construir um trocador de calor Solo-Ar para obter o NTU e, dessa forma, uma eficácia desejada.

O NTU influencia na transferência de calor com a variação dos 3 parâmetros a seguir:

- h : o coeficiente de convecção do ar dentro do tubo (W/m^2K);
- A : a superfície de transferência de calor do tubo (m^2);
- \dot{m}_{ar} : vazão mássica do ar (kg/s).

A área de transferência de calor é uma função de D e L :

$$A = \pi DL \quad (9)$$

O coeficiente de convecção dentro do tubo é definido por:

$$h = Nu \lambda / D \quad (10)$$

Onde:

Nu – número de Nusselt (adimensional), que representa a razão entre as transferências de calor por convecção e por condução;

λ – é a condutividade térmica do ar (W/m.K).

O número de Nusselt para um escoamento interno laminar em um tubo, com temperatura constante na superfície, é dado por:

$$Nu = 3,66 \quad \text{se } Re < 2300 \quad (11a)$$

Para escoamento turbulento em tubos circulares a correção dada a seguir, que inclui a região de transição pode ser usada:

$$Nu = \frac{(\xi/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7\sqrt{\frac{\xi}{8}}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)} \quad (11b)$$

Com,

$$\text{Com } \xi = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2} \quad (11c)$$

E a seguinte restrição:

$$2300 \leq Re < 5 \times 10^6 \text{ e } 0.5 < Pr < 10^6$$

A primeira equação do número de Nusselt se aplica ao fluxo laminar totalmente desenvolvido e a segunda equação se aplica ao fluxo turbulento em tubos com superfícies internas lisas. O número de Reynolds está relacionado com a velocidade do fluido, o diâmetro do tubo e a viscosidade cinemática do fluido:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (12)$$

Com:

V – velocidade de escoamento do ar (m/s);

ν – viscosidade cinemática do ar (m²/s).

A vazão em massa é dada por:

$$\dot{m}_{ar} = \rho V \frac{\pi D^2}{4} \quad (13)$$

Onde ρ é a massa específica do ar (kg/m³).

O comprimento L é um parâmetro independente que influencia o NTU. Existe uma variação linear de NTU com o comprimento. Alterando o diâmetro D ou a vazão mássica \dot{m}_{ar} ambos alteram a velocidade do ar dentro do tubo. Isso resulta na variação do número de Reynolds. D e \dot{m}_{ar} não têm, portanto, influência independente sobre o NTU.

Em geral, diminuir D aumenta a eficácia, e taxas de fluxo mais altas reduzem a eficácia. Por isso, é melhor ter vários tubos de pequeno diâmetro sobre os quais a taxa de fluxo é dividida. Tubos longos com um diâmetro pequeno são favoráveis para a transferência de calor. Eles, no entanto, aumentam a queda de pressão nos tubos, resultando em alta energia do ventilador.

Na sequência deve-se analisar a influência da queda de pressão, ou perda de carga, no escoamento do ar no trocador de calor solo-ar. A perda de carga é dividida em perda de carga distribuída e perda de carga localizada, sendo a perda de carga total a soma das duas.

A perda de carga distribuída em um tubo reto é dada pela equação:

$$\Delta p = \xi \rho \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2} \quad (14)$$

Com,

$$\xi = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2} \quad \text{se } Re \geq 2300 \quad \text{e } \xi = \frac{64}{Re} \quad \text{se } Re < 2300$$

O comprimento do tubo L é novamente um parâmetro independente que influencia a queda de pressão. A influência é linear. Diâmetro e vazão têm uma influência combinada. Se ocorrer uma pequena taxa de fluxo (vazão) por tubo e um grande diâmetro tem-se uma menor perda de pressão. Isso significa que usar muitos tubos, com um diâmetro grande é viável, mas conflita com a demanda térmica de um pequeno diâmetro. Em ambos os casos, um grande número de tubos é benéfico. A combinação do comprimento e diâmetro do tubo deve ser otimizado.

Na tubulação do trocador de calor, existem diversos elementos adicionais necessários à sua constituição, como válvulas, joelhos e conexões. Esses elementos dificultam a passagem do fluido, provocando perdas de carga nesses locais. Cada componente adicional da tubulação está relacionado a um valor de perda de carga. A perda de carga localizada é calculada pela equação (15).

$$\Delta P_L = k \rho \frac{V^2}{2} \quad (15)$$

A constante k na equação 15, o coeficiente de perda de carga localizada, recebe um valor de acordo com o somatório dos componentes que constituem o trocador de calor.

Para a configuração em paralelo, representada pelos componentes a seguir, tem-se os seguintes valores de k :

- 2 curvas de 90° com flange: 0,6;
- 1 canto de descarga no tubo acessório: 1,0;
- 1 canto de descarga na entrada dos tubos paralelos: 0,5;
- 1 canto de descarga dos tubos paralelos: 1,0.

Para a configuração em série, representada pelos componentes a seguir, tem-se os seguintes valores de k :

- 2 curvas de 90° com flange: 0,6;
- 1 redução para o tubo acessório: 0,5;
- 1 canto descarga dos tubos em serie: 1,0;
- 6 curvas 180: 1,2.

Um outro parâmetro importante é a potência hidráulica, que é a potência fornecida ao ar para que o escoamento desde a entrada até a saída do trocador de calor se realize.

A vazão de ar é impulsionada por um ventilador, do ambiente para o subsolo através dos tubos do trocador de calor. A potência hidráulica é calculada pela equação 16.

$$P_h = \dot{m} g H = \dot{m} g \frac{\Delta P}{\rho g} = \rho \dot{V} \frac{\Delta P}{\rho} = \dot{V} \Delta P \quad (16)$$

Onde:

g – aceleração da gravidade (m/s^2);

H – altura de elevação; altura de carga (m);

ΔP – perda de carga (Pa);

\dot{V} – vazão em volume (m^3/s);

P_h – potência hidráulica (W).

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como finalidade demonstrar as etapas deste estudo e como elas foram desenvolvidas, os métodos que foram aplicados para dimensionar o trocador de calor Solo-Ar para o resfriamento do ar de ambientes. Será apresentada a natureza da pesquisa, o tipo, as variáveis e indicadores coletados, o instrumento de captação e a tabulação dos dados.

3.1 Tipo de Pesquisa

De maneira filosófica, Minayo (2003) define pesquisa como uma atividade básica das ciências que buscam a realidade, uma atitude e uma prática teórica de constante procura que define um processo inacabado e permanente. Já de uma maneira mais racional, Gil (2002) define em seu livro “Como elaborar projetos de pesquisa” o termo pesquisa como “procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas a problemas que são propostos”. Quando não se dispõe de informações para responder um determinado problema, ou quando a informação se encontra desordenada, a pesquisa é requerida (GIL, 2002).

A pesquisa pode ser classificada de duas maneiras, como qualitativa ou quantitativa (MINAYO, 2003). O método qualitativo é baseado na interpretação, um conjunto de técnicas que deve ser adotado para construir uma realidade buscando estudar as conjunturas difíceis de serem descritas numericamente, as informações são reunidas pela análise, descrição e gravação. Já o conjunto de informação que podem ser quantificadas utilizando métodos estatísticos, opiniões e dados obtidos de acordo com pesquisas, análises numéricas e teste é denominada pesquisa quantitativa (SILVA, 2004).

As razões pela qual se realizam pesquisas podem ser de ordem intelectual ou ordem prática, enquanto a primeira decorre do desejo de conhecer pela própria satisfação intelectual, a segunda vem do desejo de contribuir com formas de fazer algo de maneira mais eficiente e eficaz (GIL, 2002)

O objetivo geral de uma pesquisa, segundo Gil (2002) pode ser classificado em três grandes grupos, são eles: exploratórios, descritivos e explicativos. As pesquisas exploratórias têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições, elas visam proporcionar familiaridade com um determinado problema, e torna-lo mais explícito.

As pesquisas descritivas visam à descrição de características de determinado fenômeno ou estabelecer relações entre variáveis. Já as pesquisas explicativas, identificam os fatores que

contribuem ou determinam a ocorrência dos fenômenos, de modo a aprofundar o conhecimento da realidade, explicando a razão e o porquê das coisas (GIL, 2002).

Fonseca (2002) especifica a pesquisa documental como sendo aquela elaborada através de diversas fontes sem tratamentos analíticos. Já a pesquisa ação é realizada e concebida a partir de bases empíricas em estreita associação, com a ação ou resolução de um problema. Por fim, segundo Yin (2001) o estudo de caso envolve um estudo minucioso e exaustivo de um ou mais objetos de maneira a permitir um amplo e detalhado conhecimento, com a lógica do planejamento, da coleta e da análise de dados.

A pesquisa experimental, por meio da manipulação de variáveis controladas adequadamente, possui o intuito de observar, examinar e interpretar as alterações e reações ocorridas em seu objeto de pesquisa, utilizando técnicas e equipamentos adequados, ou seja, selecionar variáveis capazes de influenciar ou definir determinado fenômeno (GIL, 2002).

Baseado nas informações apresentadas, este trabalho consiste, quanto à sua abordagem em uma pesquisa quantitativa, pois utiliza dados numéricos, cálculos e processo de análise estatística, para desenvolver o equacionamento matemático para o dimensionamento de um trocador de calor Solo-Ar. Quanto ao objetivo, em uma pesquisa exploratória, em que é apresentado os cálculos do trocador de calor Solo-Ar em um estudo de caso de resfriamento de ar para aplicação residencial.

O presente trabalho se enquadra ainda como uma pesquisa experimental, onde será aplicado e avaliado diferentes variáveis no intuito de dimensionar um trocador de calor que seja capaz de resfriar ambientes residenciais de forma eficiente e com baixo custo.

3.2 Materiais e Métodos

Um estudo bibliográfico foi realizado a fim de auxiliar na compreensão do comportamento térmico do solo, dos tipos de trocadores de calor existentes que poderiam ser empregados, dos mecanismos de trocas térmicas envolvidos no processo, bem como o equacionamento matemático para o dimensionamento de um trocador de calor que atendessem os objetivos propostos.

Após o estudo bibliográfico e da compreensão dos sistemas envolvidos, a segunda etapa do trabalho consistiu na definição das variáveis do processo, bem como, do local de aplicação, temperatura do solo, tamanho do ambiente a ser resfriado, as temperaturas iniciais e a que se deseja atingir com o dimensionamento do trocador de calor Solo-Ar.

A terceira etapa do trabalho será realizada com a aplicação do equacionamento matemático usado para determinar a área de troca térmica, a vazão mássica do fluxo de ar, número e comprimento dos tubos necessários para atender às demandas do projeto.

Por fim, na quarta etapa, é feita a análise dos dados obtidos e a apresentação do projeto do trocador de calor Solo-Ar dimensionado, que seja capaz de atender às demandas pré-estabelecidas, com baixo custo e eficiência.

3.3 Variáveis e Indicadores

Gil (2008) define o termo variável como uma medida ou classificação, uma quantidade que varia em função de indicadores. Variável é um conceito operacional que contém ou apresenta propriedade, aspecto, fator ou valores. As variáveis podem ser classificadas do ponto de vista qualitativo ou quantitativo.

Variáveis classificadas como quantitativas são divididas em discretas ou contínuas, sendo que a primeira apresenta os possíveis valores que formam um conjunto finito de números, e a segunda mostra que essas estão dentro de um intervalo, aberto ou fechado, dos números reais. As variáveis qualitativas podem ser nominais, onde não existe ordenação nas possíveis respostas, ou então ordinais, que existe determinada ordem nas possíveis respostas.

O conceito variável provém da Matemática que naturalmente é de essência quantitativa, fazendo com que as variáveis usualmente sejam classificadas como contínuas e discretas (GIL, 2008).

O trabalho em questão possui a grande maioria das variáveis classificadas como quantitativas, e os indicadores utilizados para defini-las podem ser vistos na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 1 Variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
Taxa de transferência de calor Q	Vazão mássica de ar Coeficiente de transferência de calor por convecção do ar Área de troca de calor Temperatura inicial do ambiente Temperatura desejada
Eficácia do trocador de calor	Temperatura do solo Temperatura do ar que sai Temperatura do ar que entra
Área de transferência de calor	Diâmetro do tubo Comprimento do tubo Coeficiente de transferência de calor do ar por convecção

Fonte: Pesquisa direta, 2019

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

Coletar dados é o ato de reunir documentos, provas, pesquisas sobre determinado tema e deve ser feita de maneira organizada para facilidade em análises futuras. A coleta de dados visa fornecer o embasamento necessário para o andamento da pesquisa.

Para o trabalho, a coleta de dados foi feita através de livros, manuais, normas, tabelas, catálogos, e de outros trabalhos já realizados, que auxiliam no entendimento, determinação e análise das variáveis do processo, para o dimensionamento de um trocador de calor Solo-Ar que atenda às demandas projetadas.

3.5 Tabulação de Dados

A partir dos dados de entrada de projeto serão realizados cálculos no software Microsoft Excel, o que permite rápida interação e maior facilidade para dimensionar o trocador de calor Solo-Ar proposto. Além disso, é utilizado o *software* Microsoft Word para apresentar e discutir os resultados obtidos.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Foram mostrados nesse terceiro capítulo as classificações de uma pesquisa, assim como em quais destas esse trabalho se enquadra. Apresentaram-se também ferramentas e métodos que foram aplicados para dimensionar um trocador de calor Solo-Ar para o resfriamento do ar de ambientes. Além, foram apontados todos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento efetivo da pesquisa.

No próximo capítulo será discutido os resultados encontrados e apresentado o projeto do trocador de calor Solo-Ar dimensionado, que seja mais eficiente e atenda as demandas do projeto com menor custo.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise do trocador de calor ar-solo, nas configurações em paralelo e em série, a partir do equacionamento matemático proposto.

4.1 Dados iniciais para o cálculo

De acordo com o proposto, foram definidos os parâmetros iniciais do projeto, sendo eles, vazão mássica de ar, temperatura do ar na entrada do trocador de calor, temperatura de saída do ar do trocador de calor para o ambiente a ser refrigerado, temperatura da parede interna do trocador de calor.

Sousa (2014) usou um ventilador para mover uma vazão de ar equivalente a 20 renovações por hora do ar interior, o que corresponde a um total de 2,38kg/s a uma velocidade média de 8 m/s no interior de cada tubo. Lopes (2012) estabeleceu um valor de 2,42 kg/s. Ambos os estudos consideraram ambientes comerciais maiores e com grande fluxo de pessoas que o do presente estudo.

No presente estudo foi definida a vazão mássica de 0,33 kg/s (998,3 m³/h) de ar em regime permanente no trocador de calor.

Para a temperatura do ar na entrada do trocador de calor foi atribuído o valor de 27°C. Essa atribuição foi baseada na temperatura ambiente média do local e sofre variação de acordo com a temperatura ambiente da localidade.

A temperatura da parede do trocador de calor é de 18,7°C, que corresponde a temperatura do solo na profundidade de inercia térmica (4m), onde o trocador de calor será posicionado.

Ao diâmetro do tubo interno do trocador foi inicialmente atribuído o valor de $D=0,2\text{m}$, com base em diâmetros de tubos comerciais. O diâmetro foi variado de 0,019 a 0,2m no intuito de definir a configuração mais eficiente.

Os dados de entrada estão sistematizados na Tabela 2.

Tabela 2 Dados de entrada para o cálculo do trocador de calor

Dados de Entrada	Valor
Vazão mássica	0,33 (kg/s)
Temperatura de entrada do ar	27 (°C)
Temperatura de saída do trocador	20 (°C)
Temperatura da parede do trocador	18,7 (°C)

Fonte: Pesquisa direta.

4.2 Análise do trocador de calor na configuração em paralelo

A configuração em paralelo do trocador de calor ar-solo é composta por um tubo de diâmetro $D=0,35\text{m}$ com abertura para o ambiente, onde haverá a entrada de ar à temperatura ambiente, o qual contém um ventilador para promover uma vazão de ar para o interior do trocador de calor. Internamente, a vazão de ar é dividida em um total de 6 tubos paralelos de $D=0,2\text{m}$, onde ocorrerá a troca de calor com o solo. A vazão de ar do trocador de calor é direcionada para o tubo de saída, que irá até o ambiente a ser refrigerado. O trocador de calor na configuração de tubos paralelos, é mostrado na Figura 6.

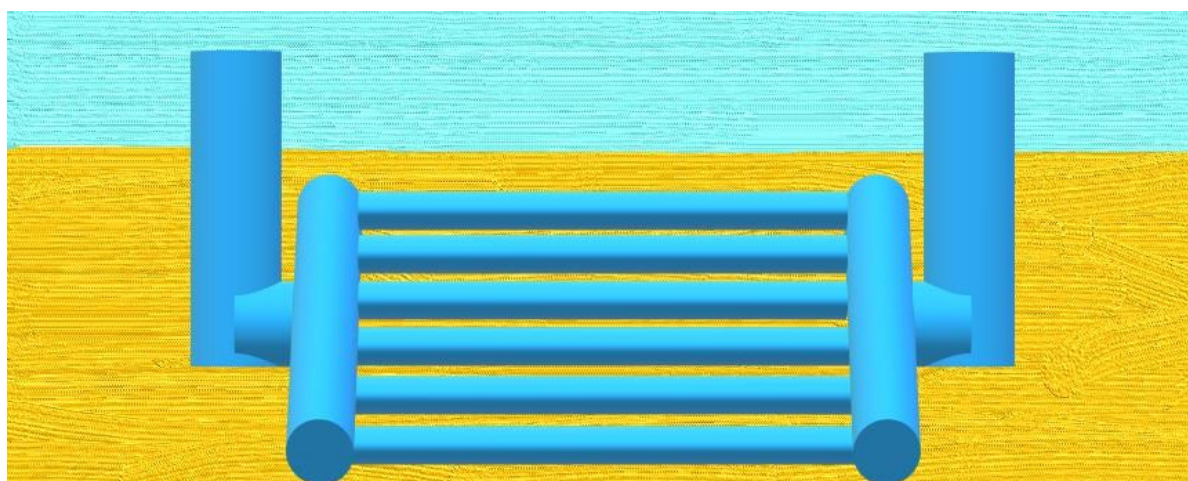


Figura 6 Trocador de calor na configuração de tubos paralelos

Fonte: Pesquisa direta.

Nessa configuração, o comprimento total L (m), obtido a partir da área de troca de calor, foi dividido em 6 tubos paralelos, no intuito de se obter uma configuração mais compacta, com os diâmetros variando de 0,019 m até 0,20 m.

As grandezas massa específica, calor específico e viscosidade foram obtidas utilizando a temperatura média do ar escoando no trocador (média entre as temperaturas de entrada e de saída do ar).

Os resultados principais, efetividade, NTU, área de transferência de calor, comprimento, perda de carga e coeficiente de transferência de calor por convecção, são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 Resultados para o trocador de calor em paralelo

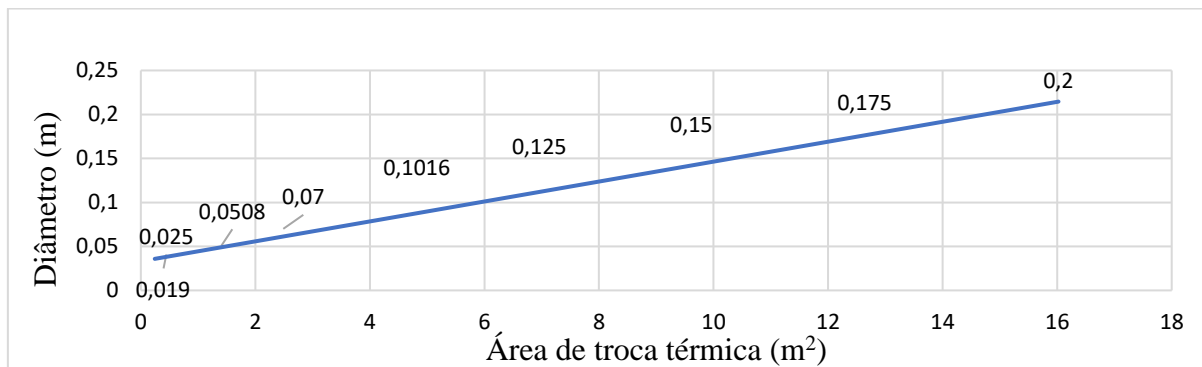
Diâmetro (m)	Eficiência	NTU	Área TC (m ²)	Comp. L (m)	Δp (Pa)	h (W/m ² .K)
0,019	0,84	1,85	0,24	4,06	8800,33	423,7
0,025	0,84	1,85	0,40	5,05	2943,15	259,0
0,051	0,84	1,85	1,40	8,81	189,43	73,0
0,070	0,84	1,85	2,49	11,31	65,80	41,3
0,102	0,84	1,85	4,82	15,10	29,05	21,3
0,125	0,84	1,85	6,96	17,72	23,02	14,8
0,150	0,84	1,85	9,61	20,40	20,60	10,7
0,175	0,84	1,85	12,64	23,00	19,56	8,1
0,200	0,84	1,85	16,02	25,51	19,05	6,4

Fonte: Pesquisa Direta

A tabela 3 apresenta os resultados obtidos com a variação do diâmetro do tubo interno do trocador de calor e sua influência nos parâmetros: área de troca de calor, comprimento total da área de troca, perda de carga no trocador de calor e o coeficiente de transferência de calor por convecção, eficiência e NTU.

A área de troca de calor varia em função do diâmetro do tubo interno do trocador, sendo diretamente proporcional a este. Para diâmetros maiores é necessária uma área de troca maior para chegar à temperatura final desejada, como mostra o gráfico 1.

Gráfico 1. Área de troca térmica em função do diâmetro do tubo

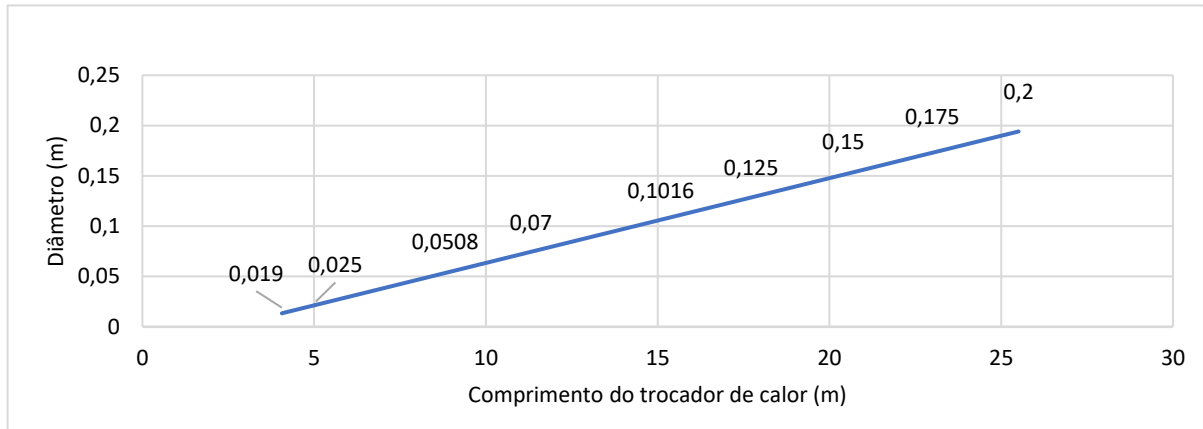


Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

A área de troca térmica sofre aumento à medida que o diâmetro do tubo aumenta, uma vez que o coeficiente de transferência de calor por convecção, a velocidade do ar e o número de Reynolds diminuem. Tem-se assim o aumento da área de troca para se obter a temperatura final especificada.

O comprimento L (m), mostrado na tabela 4.2, se refere ao comprimento de um dos seis tubos paralelos que compõem o trocador de calor, em função do diâmetro estabelecido. O gráfico 2, mostra a variação de comprimento L em função do diâmetro do tubo interno do trocador.

Gráfico 2. Comprimento do tubo em função do diâmetro

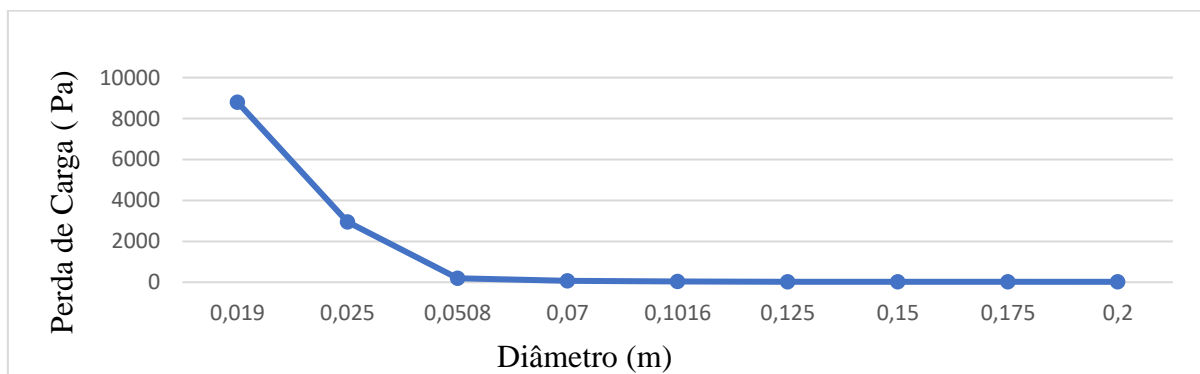


Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

O comprimento do trocador de calor aumenta à medida que o diâmetro do trocador de calor também aumenta. Os comprimentos comerciais de tubos disponíveis são em torno de 6 m, servindo assim, como parâmetro de referência para determinar o número de tubos do trocador de calor.

O gráfico 3 mostra a variação da perda de carga em função do diâmetro do tubo interno do trocador de calor.

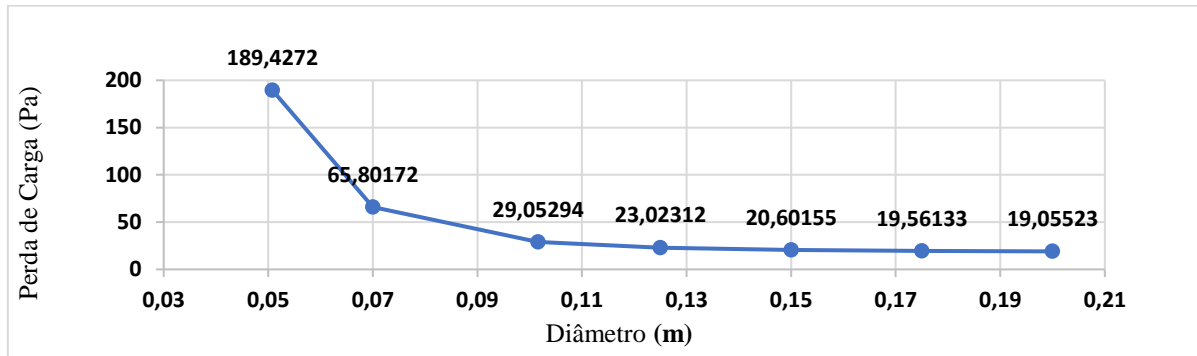
Gráfico 3 Perda de carga em função do diâmetro do tubo



Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Para melhor visualização, os menores valores do gráfico 3, foram representados no gráfico 4.

Gráfico 4 Perda de carga em função do diâmetro do tubo



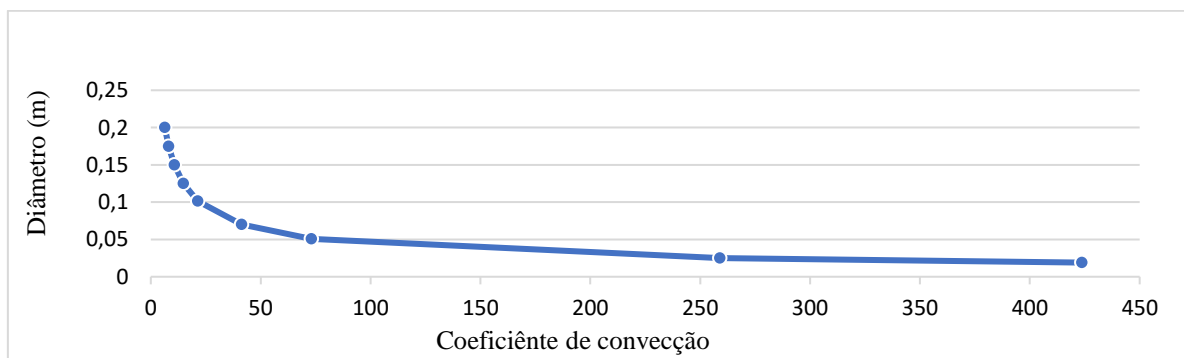
Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

A perda de carga se divide em perda distribuída e perda localizada que somadas mostram a perda total. A perda de carga varia em função do diâmetro, diminuindo quando o diâmetro é aumentado.

O aumento do diâmetro do tubo diminui a velocidade do fluxo de ar no trocador de calor, resultando na diminuição da perda de carga tanto contínua, quanto a distribuída.

Como mostrado na tabela 4.1 o coeficiente de troca de calor por convecção, diminui à medida que o diâmetro do tubo interno do trocador de calor aumenta. O gráfico 5, mostra a influência do comportamento do coeficiente de transferência de calor por convecção em função do diâmetro desse tubo.

Gráfico 5 Coeficiente de convecção em função do diâmetro do tubo



Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

O coeficiente de transferência de calor por convecção, tem relação inversa com o aumento do diâmetro do tubo interno do trocador, esse aumento provoca redução da velocidade do fluxo de ar e do Reynolds, que por sua vez, influencia diretamente na redução da taxa de transferência de calor por convecção.

A tabela 3 mostra a eficácia do trocador de calor, que varia em função das temperaturas de entrada e saída e da parede do trocador de calor, não sofrendo assim, alteração com a variação do diâmetro do tubo do trocador de calor.

Da mesma forma, a tabela 3 mostra que o NTU não sofre alteração em função do diâmetro do tubo do trocador de calor.

4.3 Análise do trocador em paralelo com o aumento da temperatura de saída

Mantido os dados iniciais, foi aumentada a temperatura de saída do trocador de calor para análise do comportamento do trocador de calor na configuração de tubos em paralelo.

A tabela 4, mostra os principais resultados obtidos a partir do aumento da temperatura de saída do trocador de calor de 20°C para 21°C.

Tabela 4 Cálculos em função do diâmetro do tubo, para a temperatura de 21°C

Diâmetro (m)	Eficácia	NTU	Area TC	Comp. (L)	Δp (Pa)	Coef. h
0,019	0,72	1,28	0,17	2,81	6107,62	423,80
0,025	0,72	1,28	0,27	3,35	2046,40	259,00
0,051	0,72	1,28	0,97	6,10	137,00	73,00
0,070	0,72	1,28	1,72	7,83	51,28	41,30
0,102	0,72	1,28	3,33	10,45	25,80	21,30
0,125	0,72	1,28	4,815	12,26	21,62	14,70
0,150	0,72	1,28	6,65	14,12	19,94	10,70
0,175	0,72	1,28	8,75	15,90	19,22	8,10
0,200	0,72	1,28	11,09	17,65	18,86	6,40

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Com o aumento da temperatura de saída do trocador de calor em 1°C, de 20°C para 21°C, a eficiência do trocador de calor cai de 0,84 para 0,72, tendo uma redução de 14,28%, não sofrendo alteração com a variação do diâmetro do tubo.

O NTU sofre redução de 1,85 para 1,28, que corresponde a uma redução de 30,95%, sem sofrer alteração com a variação do diâmetro do tubo.

A área do trocador de calor sofre alteração em função do diâmetro e da temperatura, desta forma, para o menor diâmetro (0,019m), nas duas configurações, ocorreu uma variação de 0,24m² para 0,168m², que corresponde a uma redução de 30,68%. Para o maior diâmetro analisado (0,2m), os resultados mostram que a área de troca térmica passou de 16,02 m² para 11,09 m² correspondendo há uma redução de 30,78%.

O comprimento do trocador de calor sofre alteração em função do diâmetro e da temperatura, assim, para o mesmo diâmetro, analisando-se apenas a variação da temperatura

para o menor diâmetro (0,019m), nas duas configurações, ocorreu uma variação de 4,06m para 2,81m, que corresponde há uma redução de 30,78%. Para o maior diâmetro analisado (0,2m), os resultados mostram que o comprimento do trocador de calor passou de 25,5 m para 17,65 m² mantendo a redução de 30,78%.

Para os mesmos diâmetros do tubo interno do trocador de calor, foi analisada a perda de carga para o aumento da temperatura de saída do trocador de calor. Desta forma, a perda de carga do trocador de calor, para o menor diâmetro, sofre uma redução de 8800,3 (Pa), para 6107,62 (Pa), o que corresponde à redução de 30,6%. Para o maior diâmetro analisado (0,2m), os resultados mostram que a perda de carga sofre uma pequena diminuição de 19,05 (Pa), para 18,86 (Pa), que representa uma redução de 1%.

Os dados mostram que o coeficiente de transferência de calor por convecção não sofre alteração em função do aumento da temperatura de saída do trocador de calor em 1°C, para o mesmo diâmetro.

4.4 Análise do trocador de calor na configuração em série

A configuração em série do trocador de calor ar-solo é composta por um tubo de diâmetro (D) de entrada, com abertura para o ambiente, onde haverá a entrada de ar à temperatura ambiente, o qual contém um ventilador para promover o fluxo de ar para o interior do trocador de calor. O fluxo de ar do trocador de calor escoa em regime permanente para os tubos do trocador de calor no subsolo, até o tubo de saída, que irá até o ambiente a ser refrigerado. O trocador de calor na configuração de tubos em série, é mostrada na Figura 7.

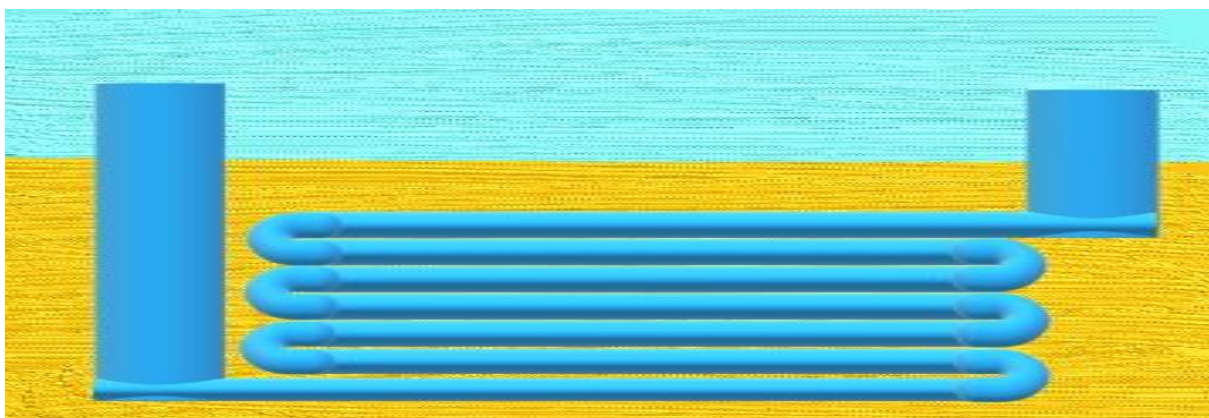


Figura 7 Trocador de calor configuração de tubos em série
Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Nessa configuração, o fluxo de ar do ambiente externo é direcionado por um tubo até o interior do trocador de calor no subsolo. O fluxo segue em regime permanente e unidirecional até o tubo de saída no ambiente residencial a ser refrigerado.

A tabela 5 mostra os dados iniciais para cálculo do trocador de calor em série.

Tabela 5 Dados iniciais para o trocador de calor em série

Dados de Entrada		Valor
Vazão de ar		0,33 (kg/s)
Temp. de entrada do ar		27 (°C)
Temp. de saída do trocador		20 (°C)
Temp. parede do trocador		18,7 (°C)
Diâmetro do tubo		0,2 (m)
Calor específico		1007 (J/kg*K)
Massa específica		1,19 (kg/m ³)

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Os parâmetros iniciais para cálculo do trocador na configuração de tubos em série são os mesmos para a configuração em paralelo, servindo assim para comparação entre as duas configurações.

A tabela 6, apresenta os principais resultados em função do diâmetro do tubo interno do trocador de calor na configuração de tubos em série.

Tabela 6 Cálculos em função do diâmetro do tubo, para o trocador de calor em série

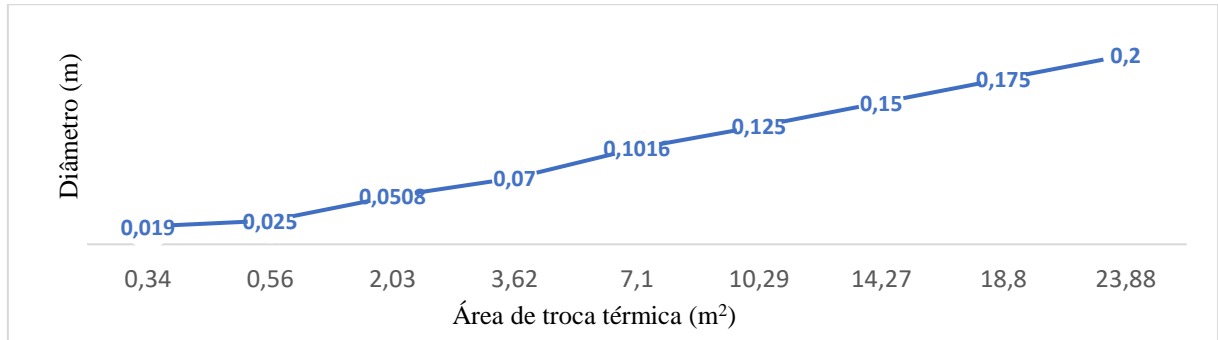
Diâmetro (m)	Eficiência	NTU	Área TC	Comp. (L)	Δp (Pa)	Coef. h
0,019	0,84	1,85	0,34	5,70	5911477,00	1811,57
0,025	0,84	1,85	0,56	7,14	1761026,00	1098,52
0,051	0,84	1,85	2,03	12,73	80207,50	303,31
0,070	0,84	1,85	3,62	16,49	20201,50	169,95
0,102	0,84	1,85	7,09	22,22	4288,30	86,88
0,125	0,84	1,85	10,29	26,21	1855,50	59,87
0,150	0,84	1,85	14,27	30,28	896,30	43,18
0,175	0,84	1,85	18,80	34,20	472,80	32,77
0,200	0,84	1,85	23,87	38,00	281,40	25,81

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Esses resultados foram obtidos com a variação do diâmetro do tubo interno do trocador de calor e mostram sua influência nos parâmetros: área de troca de calor, comprimento total da área de troca, perda de carga no trocador de calor, coeficiente de transferência de calor por convecção, eficiência e NTU.

A área de troca térmica varia em função do diâmetro do tubo interno do trocador, sendo diretamente proporcional a este. Para diâmetros maiores é necessária uma área de troca maior para chegar à temperatura final desejada, como mostra o gráfico 6.

Gráfico 6 Área de troca térmica em função do diâmetro do tubo



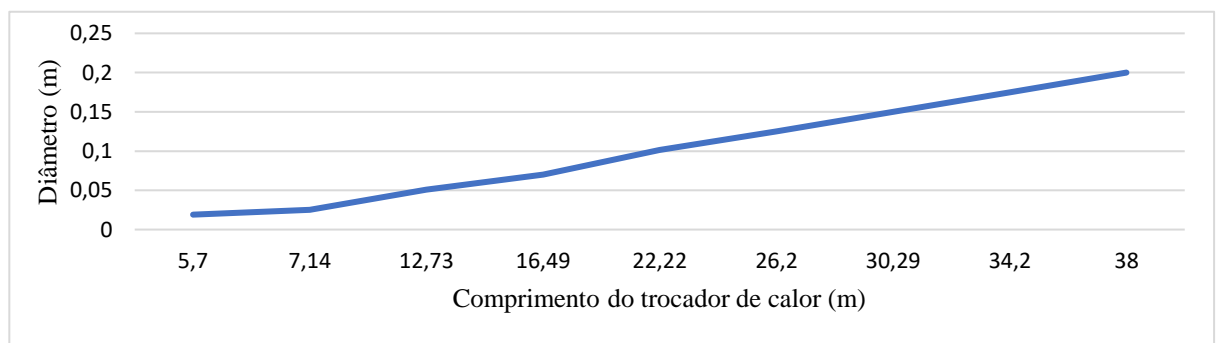
Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

A área de troca térmica sofre aumento à medida que o diâmetro do tubo aumenta, uma vez que o coeficiente de transferência de calor por convecção, a velocidade do fluxo de ar e o número de Reynolds diminuem. Havendo assim o aumento da área de troca para se obter a temperatura final estabelecida.

Na configuração em série, os resultados mostram que seria necessário maior área de troca térmica para o mesmo diâmetro na configuração em paralelo.

O comprimento L (m), mostrado na tabela 6, se refere ao comprimento total dos tubos ligados em série que compõem a área de troca térmica do trocador de calor, em função do diâmetro estabelecido. Existem ainda o tubo de entrada, tubo de saída e altura da parede onde o fluxo de ar refrigerado chega ao ambiente domiciliar, totalizando 10,8m. O gráfico 7, mostra a variação de comprimento L em função do diâmetro do tubo interno do trocador.

Gráfico 7 comprimento do tubo em função do diâmetro do tubo



Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

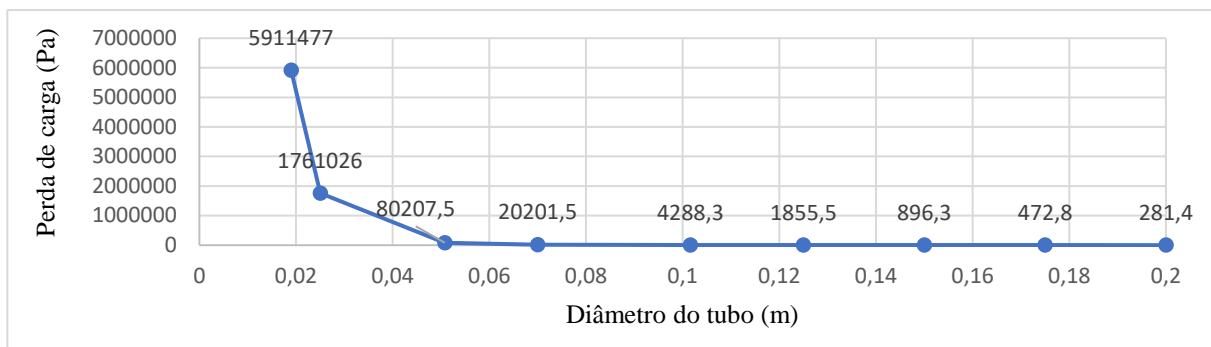
O comprimento do trocador de calor aumenta à medida que o diâmetro do trocador de calor também aumenta. Os comprimentos comerciais de tubos disponíveis são em torno de 6

m, servindo assim como parâmetro de referência para determinar o número de tubos do trocador de calor.

O comprimento do tubo na configuração em série, é maior que na configuração em paralelo para o mesmo diâmetro.

O gráfico 8 mostra variação da perda de carga em função do diâmetro do tubo interno do trocador de calor.

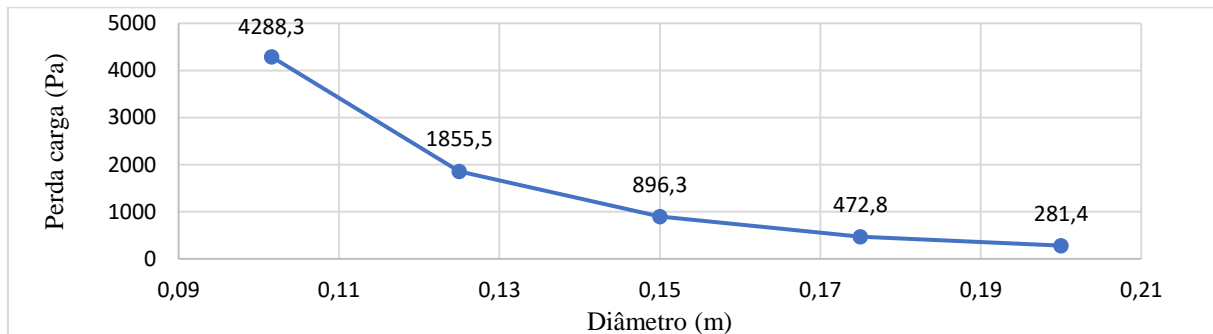
Gráfico 8 Perda de carga em função do diâmetro do tubo



Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Para melhor visualização, os menores valores do gráfico 8 foram representados no gráfico 9.

Gráfico 9 Perda de carga em função do diâmetro do tubo



Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

A perda de carga se divide em perda distribuída e perda localizada que somadas mostram a perda total. A perda de carga varia em função do diâmetro, diminuindo quando o diâmetro é aumentado.

O aumento no diâmetro do tubo diminui a velocidade do fluxo de ar no trocador de calor, resultando na diminuição da perda de carga tanto contínua, quanto distribuída.

A perda de carga na configuração de tubos em série é maior que na configuração de tubos paralelos.

4.5 Análise do trocador em série com aumento da temperatura de saída

Mantidos os dados iniciais, foi aumentada a temperatura de saída do trocador de calor para análise do comportamento dos parâmetros do trocador de calor na configuração de tubos em série, em função da temperatura.

A tabela 7, mostra os principais resultados obtidos a partir do aumento da temperatura de saída do trocador de calor de 20°C para 21°C.

Tabela 7 Cálculos em função do diâmetro do tubo, para o trocador de calor em Série

Diâmetro (m)	Eficácia	NTU	Área TC	Comp. (L)	Δp (Pa)	Coef. h
0,019	0,72	1,28	0,23	3,94	5329158,00	1812,04
0,025	0,72	1,28	0,39	4,94	1528675,00	1098,81
0,051	0,72	1,28	1,40	8,81	66598,10	303,39
0,070	0,72	1,28	2,51	11,41	16430,50	170,00
0,102	0,72	1,28	4,90	15,38	3440,01	86,90
0,125	0,72	1,28	7,12	18,14	1485,67	59,90
0,150	0,72	1,28	9,87	20,96	688,76	43,20
0,175	0,72	1,28	13,00	23,67	360,76	32,78
0,200	0,72	1,28	16,52	26,30	215,8	25,82

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Com o aumento da temperatura de saída do trocador de calor em 1°C, de 20°C para 21°C, a eficiência do trocador de calor cai de 0,84 para 0,72, tendo uma redução de 14,28%, não sofrendo alteração com a variação do diâmetro do tubo.

O NTU sofre redução de 1,85 para 1,28 que corresponde a uma redução de 30,95%, sem sofrer alteração com a variação do diâmetro do tubo.

A área do trocador de calor sofre alteração em função do diâmetro e da temperatura, desta forma para o menor diâmetro (0,019m), nas duas configurações, ocorreu uma variação de 0,34m² para 0,23m², que corresponde há uma redução de 32,35%. Para o maior diâmetro analisado (0,2m), os resultados mostram que a área de troca térmica passou de 23,87 m² para 16,52 m² correspondendo há uma redução de 29,91%.

O comprimento do trocador de calor sofre alteração em função do diâmetro e da temperatura, assim para o mesmo diâmetro, analisando apenas a variação da temperatura para o menor diâmetro (0,019m), nas duas configurações, ocorreu uma variação de 5,70m para 3,94m, que corresponde há uma redução de 30,88%. Para o maior diâmetro analisado (0,2m), os resultados mostram que o comprimento do trocador de calor passou de 38,00 m para 26,30m, mantendo a redução de 30,79%.

Para os mesmos diâmetros do tubo interno do trocador de calor, foi analisada a perda de carga para o aumento da temperatura de saída do trocador de calor. Desta forma a perda de carga do trocador de calor sofre uma redução de 5911477,00 (Pa), para 5329158,00 (Pa), que corresponde a uma redução de 9,85%. Para o maior diâmetro analisado (0,2m), os resultados mostram que a perda de carga sofre uma pequena diminuição de 281,40 (Pa), para 215,8 (Pa), que representa uma redução de 23,31%.

Os dados mostram que o coeficiente de transferência de calor por convecção não sofre alteração em função do aumento da temperatura de saída do trocador de calor para o mesmo diâmetro.

A tabela 8 mostra os resultados obtidos a partir da variação da temperatura de saída do trocador de calor.

Tabela 8 Resultados após variação da temperatura em 1°C

Trocador de calor tubos Paralelos			Trocador de calor tubos em série		
	20°C	21°C		20°C	21°C
Eficiência	0,84	0,72 (-14,28%)	Eficiência	0,84	0,72 (-14,28%)
NTU	1,85	1,28(-30,95%)	NTU	1,85	1,28(-30,95%)
Área de troca (m ²)	16	11,09 (-30,78%)	Área de troca (m ²)	23,9	15,5 (-29,91%)
Comprimento (m)	25,5	17,65 (-30,78%)	Comprimento (m)	38	26,3 (-30,79%)
Perda de carga (Pa)	19,05	18,86 (-1%)	Perda de carga (Pa)	281	215,8 (-23,31%)
Coef. convec. (W/m ² k)	6,4	6,4	Coef. convec. (W/m ² k)	25,8	25,8

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

4.6 Potência hidráulica

O fluxo de ar é impulsionado por um ventilador, do ambiente para o subsolo através dos tubos do trocador de calor, e deste para o recinto a ser resfriado. Para analisar a influência da perda de carga na energia fornecida ao escoamento do ar, determinou-se a potência hidráulica, que é a potência fornecida pelo ventilador ao ar. A tabela 9, mostra os resultados da potência hidráulica para cada situação analisada.

Tabela 9 Potência hidráulica para cada situação analisada

	Paralelo 20°C	Paralelo 21°C	Série 20°C	Série 21°C
Diâmetros (m)	Pot. Hidr. (W)	Pot. Hidr. (W)	Pot. Hidr. (W)	Pot. Hidr. (W)
0,019	23940,6	16643,3	16081701,3	14521955,6
0,025	8006,6	5576,4	4790730,7	4165639,4
0,0508	515,3	373,3	218198,1	181479,8
0,07	179,0	139,8	54956,6	44773,1
0,1016	79,0	70,3	11666,0	9374,0
0,125	62,6	58,9	5047,8	4048,5
0,15	56,0	54,3	2438,3	1876,9
0,175	53,2	52,4	1286,2	983,1
0,2	51,8	51,4	765,5	588,0

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

A Tabela 9 mostra a comparação das potências hidráulicas do ar em escoamento para as configurações de trocador de calor em paralelo e em série. Observa-se que a potência fornecida pelo ventilador ao ar é sempre menor na configuração em paralelo do que na configuração em série. Essa redução de potência corresponde há uma redução de 1377% para o diâmetro de 0,2 m. Para o menor diâmetro analisado a potência hidráulica seria muito elevada, sendo os valores impraticáveis para um trocador de calor Solo-Ar.

5 CONCLUSOES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo dimensionar um trocador de calor Solo-Ar para o resfriamento do ar de ambientes. Para se projetar um trocador de calor Solo-Ar é necessário definir as condições a serem atendidas. Dessa forma, os parâmetros, vazão mássica de ar, temperatura de entrada e de saída do ar no trocador de calor e temperatura do solo foram especificadas.

Através de cálculos específicos, parâmetros do trocador como: configuração de tubos em série e em paralelo, variações na temperatura de saída do trocador de calor para o ambiente residencial e variações do diâmetro do tubo interno do trocador de calor foram analisadas.

A eficácia do trocador de calor permanece constante nas duas configurações, porém a mesma cai em 14,28%, quando se eleva a temperatura de saída do trocador de calor em 1°C, exigindo menor desempenho do trocador de calor.

Quanto ao diâmetro do tubo do trocador de calor, os resultados mostram um melhor desempenho térmico para diâmetros menores. Para diâmetros maiores é necessária maior área de troca de calor e maior comprimento do tubo do trocador de calor para que não haja diminuição da eficácia do trocador, tanto para a configuração de tubos paralelos, quanto para a em série.

A área de troca térmica é menor na configuração em paralelo, mostrando melhor desempenho quando comparada à configuração em série, que apresentou aumento médio de 48,2%, para as mesmas condições de cálculo. Quando a temperatura de saída foi elevada em 1°C, a área de troca térmica caiu em média 30,3%, nas duas configurações. Com aumento da temperatura de saída do trocador de calor, a exigência de desempenho do trocador diminui.

O comprimento do tubo na configuração em série é maior que na configuração em paralelo para o mesmo diâmetro. Esse aumento corresponde a 47,4% em média, quando comparado com os comprimentos dos tubos em paralelo, assim como a área de troca térmica. Quando se aumenta a temperatura de saída em 1°C, o comprimento do tubo sofre uma redução média de 30,8% para ambas as configurações.

A perda de carga no trocador de calor é menor na configuração em paralelo, e quando comparadas com a perda de carga em série, os cálculos mostram um aumento de 64,15%, em média. Essa média sofre grande influência da perda de carga para os menores diâmetros, que

representam as maiores perdas de carga, elevando substancialmente, a potência necessária para o seu funcionamento a valores impraticáveis para trocadores de calor de pequeno e médio porte. Quando se analisa isoladamente o maior diâmetro estudado, a perda de carga sofre aumento de 1377% na configuração em série. A perda de carga diminui com o aumento da temperatura em 1°C. Para a configuração em paralelo a redução é de 1%, e para a configuração em série é 23,3%.

O NTU permanece constante para ambas as configurações, porém sofre redução de 30,95%, quando se eleva a temperatura em 1°C.

Os resultados mostram que o coeficiente de troca de calor por convecção é menor para a configuração em paralelo, sofrendo um aumento de 303% na configuração em série. Foi observado que o coeficiente de troca de calor por convecção permanece constante com o aumento da temperatura em 1°C, nas mesmas configurações.

Através do dimensionamento do trocador Solo-Ar para resfriamento de um ambiente residencial, pode-se analisar os resultados de um trocador de calor em duas configurações de projeto, uma em paralelo e outra em série. Desta forma, o comprimento, a área de troca térmica e a perda de carga do trocador de calor foram menores para a configuração em paralelo, para uma mesma eficácia do trocador de calor. Pôde-se ainda analisar a influência do aumento da temperatura de saída do trocador de calor, que permitiu uma redução na eficácia do trocador de calor, determinando a redução do comprimento, área de troca e perda de carga no trocador de calor.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Estudos sobre trocadores de calor Solo-Ar são de grande relevância, seja por motivos de conforto térmico, econômicos ou ambientais. A indisponibilidade de grande acervo bibliográfico sobre o tema revela um campo de exploração ainda incipiente, principalmente de trabalhos a nível nacional. Sendo assim, recomenda-se para trabalhos futuros novas pesquisas que explorem o uso de formas de energia renováveis para o funcionamento do trocador de calor Solo-Ar, integrado com o ambiente a ser resfriado, e também a implementação de um modelo matemático para a análise da distribuição de temperatura no solo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ARAÚJO, EVERALDO CÉSAR DA COSTA, **Trocadores de calor**. Universidade Federal de São Carlos; EdUFSCar. 2002.
- BRUM, R.; ROCHA L.; **Otimização Geométrica De Trocadores De Calor Solo-Ar Baseada Na Lei Costructural, XXXVI**; Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2015.
- Brum, Ruth da Silva. **Teoria Construtal E Desempenho Térmico De Trocadores De Calor Solo-Ar**; 2016.
- CÔRTE, RAÍSSA RODRIGUES ALVES, **Avaliação Comparativa Do Titânio Edo Aço Inoxidável Superaustenítico Para Aplicação Em Permutadores De Calor Do Tipo Placas**; Universidade Federal Fluminense Niterói, 2014.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA, **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética - 2018**
- FREITAS, G.C.; DATHEIN, R. **As Energias Renováveis No Brasil: Uma Avaliação Acerca Das Implicações Para O Desenvolvimento Socioeconômico E Ambiental**. Revista Nexos Econômicos, v. 7, n. 1, p. 71-94, 2013.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza;UEC, 2002. Apostila.
- SOUSA, ÉLIO DE CASTRO, **Aplicabilidade de sistemas de ventilação com permutador de calor ar-solo no clima português**; 2014.
- GASPARIM, E.; Ricieri1, R.P.; Silva, S.L.; Dallacort, R.; Gnoato, E. **Temperatura no perfil do solo utilizando duas densidades de cobertura e solo nu**. Acta Scientiarum, 2005.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**;São Paulo: Atlas, 1999.
- JANSSENS, A; Paepe, M; **Design of earth-air heat exchangers**; A. 2003.
- KAKAÇ, Sadik; LIU, Hongtan. **Heat exchangers: selection, rating, and thermal design**; 2nd. ed. New York: Crc Press, 2002.
- LOPES, FREDERICO SÉRGIO MARQUES ESPINHA, **Dimensionamento de um Permutador de Calor Terra-Ar e Avaliação de Impacte na Climatização de um Edifício**;2012.
- MINAYO, M. C. S. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**; 22 ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2003.
- NASCIMENTO, R; GEZIELE, A. **Fontes alternativas e renováveis de energia no brasil: métodos e benefícios ambientais**. Maringá, 2016.
- Revista Mundi Engenharia, **Tecnologia e Gestão**. Curitiba, PR, 2016.

RODRIGUES, M. K. ET AL. **Simulação Numérica de Trocador de Calor Solo-Ar Constituído por Formas Geométricas Complexas**; Revista Cereus, 2018.

SAUNDERS, E. A. D. **Heat exchangers: selection, design and construction**. Longman Scientific & Technical; 1988, Harlow.

SOUZA, DIEGO AMORIM CAETANO, **Simulação Fluidodinâmica E Otimização De Trocadores De Calor Compactos Com Aletas Ventiladas Do Tipo “Louver**; 2015.

VAZ, C. et al; **Simulação Numérica E Design Construtal Aplicados À Análise De Um Trocador De Calor Solo-Ar Para O Aproveitamento Do Potencial Energético Do Solo**.

VAZ, J; **Estudo Experimental E Numérico Sobre O Uso Do Solo Como Reservatorio De Energia Para O Aquecimento E Resfriamento De Ambientes Edificados**; UFRGS, 2011.

http://www.ufjf.br/washington_irrazabal/files/2014/05/Aula-23_Trocadores-de-Calor.pdf

acesso em 28/06/2019.

<https://www.cdcequipamentos.com/tipos-trocador-calor>, acesso em 28/06/2019.

http://braskor.com.br/opal_service/trocador_de_calor/ acesso em 28/06/2019.

<https://sites.google.com/site/scientiaestpotentiaplus/trocadores-de-calor-espiais>