

MARCOS YUKIO TOKUUE HORI

**Simulação do escoamento em uma rede de dutos de um
sistema de condicionamento de ar**

Marcos Yukio Tokuue Hori

**Simulação do escoamento em uma rede de dutos de um
sistema de condicionamento de ar**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Alex Mendonça Bimbato

H811s Hori, Marcos Yukio Tokuue
Simulação do escoamento em uma rede de dutos de um sistema de condicionamento de ar / Marcos Yukio Tokuue Hori. – Guaratinguetá, 2018.
41 f : il.
Bibliografia: f. 40-41

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Alex Mendonça Bimbato

1. Ar condicionado. 2. Método dos elementos finitos - Processamento de dados. 3. Métodos de simulação I. Título

CDU 628.84

MARCOS YUKIO TOKUUE HORI

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

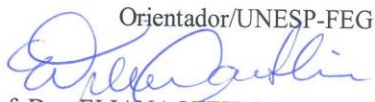
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ALEX MENDONÇA BIMBATO

Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dra. ELIANA VIEIRA CANETTIERI

UNESP-FEG


Prof. Dra. IVONETE ÁVILA

UNESP-FEG

Dezembro de 2018

Dedico este trabalho a Deus, pela força durante a longa caminhada, aos meus pais pelo apoio e carinho nessa jornada e aos colegas do estágio, que me ajudaram na conclusão da monografia.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por ter me proporcionado saúde e segurança e por ter possibilitado desfrutar de inúmeras oportunidades até hoje.

Agradeço também aos meus pais, minha mãe Cristina e meu pai Adilson, por todo o incentivo e apoio durante a vida, pelo ensinamento dos valores mais básicos e por serem exemplos como pessoas.

Ao meu orientador, Prof. Alex Mendonça Bimbato por sua paciência, orientação, apoio e dedicação.

Aos meus colegas e amigos, que sempre me apoiaram nos estudos.

À Heating Cooling e aos seus colaboradores, por possibilitar a realização do experimento dentro da empresa.

“Mesmo desacreditado e ignorado por todos,
não posso desistir, pois para mim, vencer é
nunca desistir.”

Albert Einstein

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se a necessidade da Heating Cooling, empresa instaladora de ar condicionado industrial, viabilizar o uso de um *software* para calcular a perda de carga na rede de duto de ar condicionado, ou para simular numericamente a passagem de ar ao longo da linha, observando visualmente quais pontos estão críticos para o insuflamento do ar. Foi escolhido o uso de um *software* para realizar simulações numéricas pela melhor visualização dos resultados. Com o intuito de validar o seu uso, foram comparados os valores médios de velocidade nas saídas do duto que foram obtidos de forma prática e teórica. Assim, pode-se determinar a velocidade de entrada necessária no duto para atender a demanda necessária de ar em um ambiente a ser condicionado. Primeiramente foi realizado o experimento em um duto com duas saídas, fabricado pela empresa, e um ventilador centrífugo, que foi acoplado na entrada do duto. Utilizou-se um anemômetro digital como instrumento para medir as velocidades na saída do ventilador e nas saídas do duto, calculando posteriormente a média dos valores obtidos. Depois, uma simulação foi realizada em um *software* comercial que se baseia no Método dos Volumes Finitos para discretizar o modelo analisado, utilizando como uma das condições de contorno o valor da velocidade média na saída do ventilador. Após a simulação, foram gerados os valores médios de velocidade nas saídas dos dutos. Ao comparar os resultados, notou-se que os valores médios gerados pela simulação se mostraram superiores em relação aos valores médios obtidos no experimento. No entanto, existem valores medidos no experimento que são superiores ao valor médio obtido na simulação. O fato dos valores experimentais serem inferiores foi justificado devido à imprecisão do instrumento de medição.

PALAVRAS-CHAVE: Método dos volumes finitos. Duto. Ar condicionado. Simulação Numérica.

ABSTRACT

This work presents the need for Heating Cooling, an industrial air conditioning installation company, to enable the use of a software to calculate the pressure drop in the air conditioning duct network, or to numerically simulate the air flow along the line, observing visually which points are critical to air inflation. The use of software to perform numerical simulations was chosen for better visualization of the results. In order to validate its use, a comparison of the average values of velocity at the duct exits that were obtained in a practical and theoretical way is performed. Thus, it can determine the required inflow velocity in the duct to supply the required air demand in an environment to be conditioned. First, the experiment was carried out in a duct with two exits, manufactured by the company, and a centrifugal fan, which was coupled to the duct entrance. A digital anemometer was used as an instrument to measure the velocities at the fan output and at the duct exits, calculating afterwards the average values of velocities. Then, the simulation was performed in a commercial software that is based on the Finite Volume Method to discretize the analyzed model, using as one of the boundary conditions the value of the average velocity at the fan output. After the simulation, the average velocity values were generated at the duct exits. When comparing the results, it was noticed that the average values generated by the simulation are higher than the average values obtained in the experiment. However, there are values measured in the experiment that are higher than the average value obtained in the simulation. The fact that the experimental values were lower was justified due to the imprecision of the measuring instrument.

KEYWORDS: Finite volume method. Duct. Air conditioning. Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de um <i>split</i>	17
Figura 2 – Esquema de um sistema de ar condicionado por expansão indireta	18
Figura 3 – Duto com seção transversal constante e duto com seção transversal variável.....	19
Figura 4 – Desenho 3D do duto com identificação	22
Figura 5 – Desenho 2D do duto cotado	22
Figura 6 – Forças atuando no volume de controle infinitesimal	25
Figura 7 – Ventilador centrífugo	32
Figura 8 – Anemômetro Digital.....	32
Figura 9 – Pontos de medição na saída do ventilador	33
Figura 10 – Manuseio do anemômetro	33
Figura 11 – Espumas utilizadas nas uniões das peças	34
Figura 12 – Duto acoplado no ventilador	34
Figura 13 – Identificação das saídas do duto.....	35
Figura 14 – Pontos de medição na saída 1 do duto	35
Figura 15 – Linhas de corrente no duto.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do anemômetro digital.....	33
Tabela 2 – Valores obtidos experimentalmente	36
Tabela 3 – Valores de velocidades médias calculados pelo software	37
Tabela 4 – Comparação dos valores obtidos	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CFD	Computational Fluid Dynamics
FDM	Finite Difference Method
FEM	Finite Element Method
FVM	Finite Volume Method
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
VRF	Variable Refrigerant Fluid

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do tubo
C_P	Calor específico
D_h	Diâmetro hidráulico
$\vec{g}$	Aceleração gravitacional local
k	Condutibilidade térmica do fluido
M	Número de Mach
P	Perímetro da seção transversal do tubo
Pa	Pascal
p	Campo de Pressões
S	Área
T	Forma adimensional da temperatura
t	Tempo
t^*	Tempo na forma adimensional
u_k	Velocidade associada
V	Velocidade do fluido
$\vec{V}$	Campo de velocidades
$\vec{V}^*$	Velocidade vetorial na forma adimensional
$\vec{v}$	Velocidade absoluta do fluido
v_o	Velocidade de escoamento do ar no duto
v_s	Velocidade de propagação do som no ar
$\vec{v}_s$	Velocidade da superfície
x_k	Eixo do sistema cartesiano
α	Difusividade térmica
ρ	Massa específica
μ	Viscosidade absoluta do fluido
ϑ	Volume
θ	Temperatura na forma adimensional
ϕ	Campo escalar geral
$\Gamma\phi$	Coeficiente de difusão

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1.	MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS - FDM.....	15
2.2.	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS - FEM.....	15
2.3.	MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS - FVM.....	16
2.4.	DUTOS DE AR CONDICIONADO	16
2.5.	MÉTODO DE VOLUMES FINITOS APLICADO A SIMULAÇÕES DE REDES DE DUTOS.....	20
3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA.....	22
3.1.	GEOMETRIA E DEFINIÇÕES.....	22
3.2.	EQUAÇÕES GOVERNANTES.....	24
3.2.2.	Princípio da conservação da quantidade de movimento linear	25
3.2.3.	Princípio da conservação de energia	26
3.3.	CONDIÇÕES DE CONTORNO	26
3.4.	ADIMENSIONALIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES	27
4	MÉTODO DE SOLUÇÃO	29
4.2.	SOFTWARE	30
4.2.1.	Geração de malhas.....	30
4.2.2.	Condições de contorno.....	31
4.3.	EXPERIMENTO	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
6	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

O sistema de ar condicionado como é conhecido nos dias de hoje sofreu várias mudanças e aprimoramentos desde a sua criação, em 1902, pelo engenheiro norte-americano Willis Carrier. Com o passar dos anos, o ar condicionado vem deixando de ser um artigo de luxo e o seu uso vem se mostrando fundamental por apresentar vários benefícios, tanto na conservação de produtos como no condicionamento de ambientes para a operação de equipamentos e conforto humano. A utilização do ar tratado ocorre em três situações fundamentais: conforto térmico, processos industriais e preservação da vida de equipamentos especiais (FURLAN, 2000).

Atualmente existem organizações que regulamentam a instalação dos sistemas de ar condicionado, como a ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), responsável por investigar, publicar e estabelecer normas, bem como organizações que certificam as instalações, sendo uma delas o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), que avaliam os sistemas de ar condicionado em quesitos como a eficiência energética e a qualidade ambiental no interior do edifício (BOLLIGER JÚNIOR; MARIANI, 2017)

Hoje há no mercado diferentes tipos de ar condicionado, sendo eles o sistema tipo Split, sistema tipo VRF, sistema Self Contained, tipo janela e sistema de ar condicionado central.

O sistema tipo Split consiste na instalação de uma máquina condicionadora para cada máquina evaporadora. Assim, uma condicionadora é responsável por levar o fluido refrigerante resfriado à um evaporador, que realizará a troca de calor do fluido com o ar. O ar resfriado é insuflado ao ambiente e esse mesmo fluido, agora mais quente, volta para o condensador, repetindo assim o processo.

O sistema tipo VRF mostra-se parecido com o tipo Split. A diferença é que apenas uma condicionadora consegue suprir a demanda de várias evaporadoras.

O Self Contained trata-se de um equipamento que une a condensadora e a evaporadora num único gabinete, atingindo maior capacidade térmica comparado ao tipo Split e VRF, mas acaba ocupando mais espaço.

No tipo janela, um único aparelho agrupa os componentes necessários para insuflar o ar gelado e o equipamento é instalado na parede ou na janela.

O sistema de ar condicionado central, que supre o ar tratado por meio de rede de dutos localizados na parte superior dos ambientes, é o mais utilizado em edifícios e indústrias. Esse sistema prevê a renovação do ar, através da mistura com o ar externo, a uma taxa mínima, e

mantém os ambientes condicionados à temperatura e umidade desejadas, além de consumir menos energia e ser mais discreto visualmente.

No entanto, o dimensionamento de dutos não é simples. É necessário realizar cálculos de perda de carga, aliado com o cálculo de carga térmica, a fim de não superdimensionar o projeto instalando equipamentos com capacidades acima do necessário. Fatores como o material utilizado, perfil dos dutos (seção transversal, curvas e ramificações) e a vazão influenciam nos cálculos.

A motivação para o desenvolvimento do presente trabalho vem da necessidade da Heating & Cooling, empresa que atua no segmento de engenharia de instalação de sistemas HVAC (Ar condicionado, Ventilação e Exaustão Mecânica), simular a passagem de ar pelo sistema de dutos, a fim de identificar e otimizar os locais com as maiores perdas de carga. No passado, o *software* E20-II, da Carrier, era utilizado no sistema operacional MS-DOS e, com as atualizações do sistema operacional, o mesmo tornou-se obsoleto. Desde então a empresa contrata um serviço terceirizado para calcular as perdas de carga na rede de dutos.

A fim de ajudar na escolha das máquinas e evitar aquisições de equipamentos com capacidades superiores ao necessário, foram realizadas simulações do escoamento de ar pela rede de dutos através de um *software* comercial. Inserindo condições de contorno, o programa gera resultados como a velocidade de saída na rede de dutos. Tais valores são utilizados para verificar a proximidade dos dados gerados pelo programa computacional com os dados experimentais. A passagem de ar será simulada através da modelagem em um duto que será fabricado pela Heating & Cooling e os dados experimentais serão obtidos através de medições com um anemômetro digital.

O *software* utiliza o Método de Volumes Finitos para realizar a simulação fluidodinâmica computacional. Esse método demanda um menor custo computacional quando se aborda problemas de mecânica dos fluidos.

O presente trabalho teve como objetivo viabilizar o uso de um *software* comercial nos projetos de instalação de dutos de ar condicionado industrial na empresa Heating & Cooling. Foram coletados valores de velocidade nas saídas do duto de ar condicionado por meio da simulação numérica, através da análise pelo Método dos Volumes Finitos, e por meio do ensaio experimental.

A comparação dos valores teóricos e práticos obtidos nas saídas da rede de dutos permitiu a validação desse método para analisar os valores necessários na entrada do duto, podendo ser aplicado em futuros projetos pela empresa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o passar dos anos, o uso de programas para a realização de simulações numéricas vem aumentando gradativamente, e isso se deve à vários fatores, como o aperfeiçoamento e o surgimento dos programas que possibilitam simplificar o desenvolvimento de projetos e reduzir custos com diversos experimentos.

Atualmente, os métodos de discretização mais utilizados são o Método das Diferenças Finitas, o Método dos Elementos Finitos e o Método dos Volumes Finitos, sendo este último o mais utilizado em CFD (do inglês, *Computational Fluid Dynamics* – Dinâmica dos Fluidos Computacional) (KESSLER, 2016).

2.1. MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS - FDM

Introduzido por Euler no século 18, o FDM (sigla em inglês para *Finite Difference Method*) é o mais antigo para solucionar equações diferenciais parciais e, também, o mais utilizado para solucionar problemas em geometrias mais simples. Este método consiste na conservação da equação na forma diferencial, onde o domínio de solução é coberto por uma malha. A equação é aproximada em cada ponto da malha, onde os termos de valores das funções nos nós da malha substituem as derivadas parciais, resultando em uma equação algébrica por nó. Expansões em séries de Taylor ou regressões polinomiais podem ser utilizadas para obter aproximações para a primeira e a segunda derivadas de variáveis em função das coordenadas e, quando necessário, pode-se obter os valores das variáveis fora dos nós da malha através de interpolação. Este método mostra-se simples e eficaz em malhas estruturadas pois não é difícil obter os métodos de elevada ordem em malhas regulares. No entanto, tal método apresenta uma desvantagem significativa quando comparado a outros pela restrição na aplicação a geometrias mais simples. (GONÇALVES, 2007).

2.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS - FEM

No FEM (sigla em inglês para *Finite Element Method*), o domínio de solução é dividido em um conjunto de elementos onde, em 2D, têm a forma de triângulos ou quadriláteros e, em 3D, têm a forma de tetraedros ou hexaedros. Neste método, multiplica-se a equação de conservação por uma função peso e depois a equação é integrada sobre todo o domínio. A solução é aproximada por uma função linear com os elementos de forma que a continuidade da

solução é garantida através das fronteiras dos elementos. A fim de selecionar a melhor solução dentro do conjunto de funções, a aproximação é substituída na integral da lei da conservação e as equações são derivadas requerendo que a derivada da integral relativa ao valor de cada nó seja nula, resultando em um conjunto de equações algébricas não lineares. A capacidade do FEM de lidar com geometrias arbitrárias mostra-se como uma vantagem, podendo refinar as malhas facilmente em regiões de interesse. (GONÇALVES, 2007).

2.3. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS - FVM

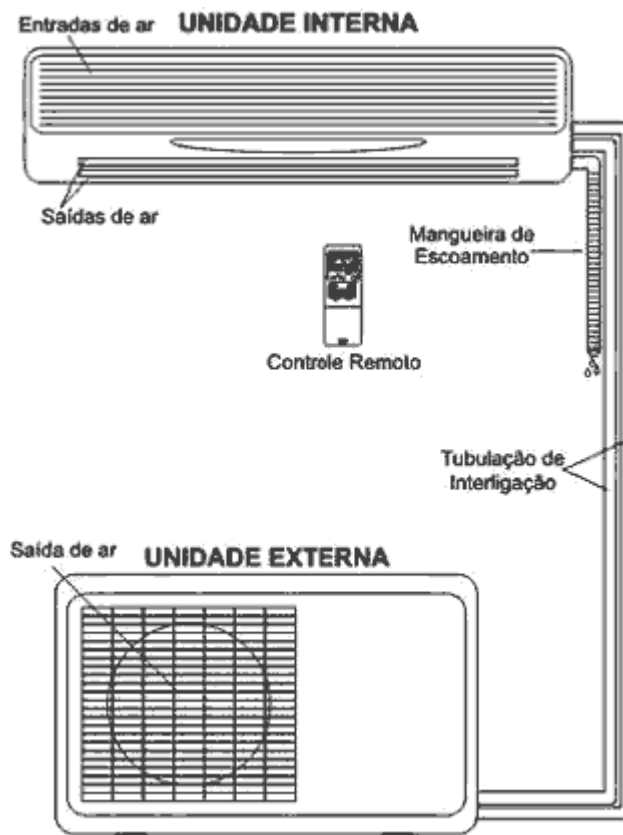
No FVM (sigla em inglês para *Finite Volume Method*), o domínio de solução é dividido num número finito de volumes de controle e aplica-se a equação da conservação para cada volume. No centróide de cada volume localiza-se um nó onde são calculadas as variáveis, e os valores das variáveis nas superfícies são obtidos por interpolação em função do centro do volume de controle. Aproxima-se as integrais de superfície e de volume utilizando fórmulas de quadratura adequadas, resultando em uma equação algébrica para cada volume de controle onde aparecem as variáveis nos nós (GONÇALVES, 2007).

Este método pode ser aplicado a qualquer tipo de malha e, também, a geometrias mais complexas, ao contrário do FDM.

2.4. DUTOS DE AR CONDICIONADO

Os sistemas de ar condicionado dutados geralmente são empregados em edifícios comerciais e indústrias, proporcionando uma refrigeração eficiente, uma melhor aparência (os dutos podem ser instalados na parte superior do forro, não ficando visível) e um gasto menor de energia, se comparado à instalação de vários *splits* (equipamentos condicionadores de ar similares aos equipamentos do tipo janela, sendo divididos em dois módulos: unidade interna (evaporador) e unidade externa (condensador), conforme Figura 1).

Figura 1 – Esquema de um *split*.



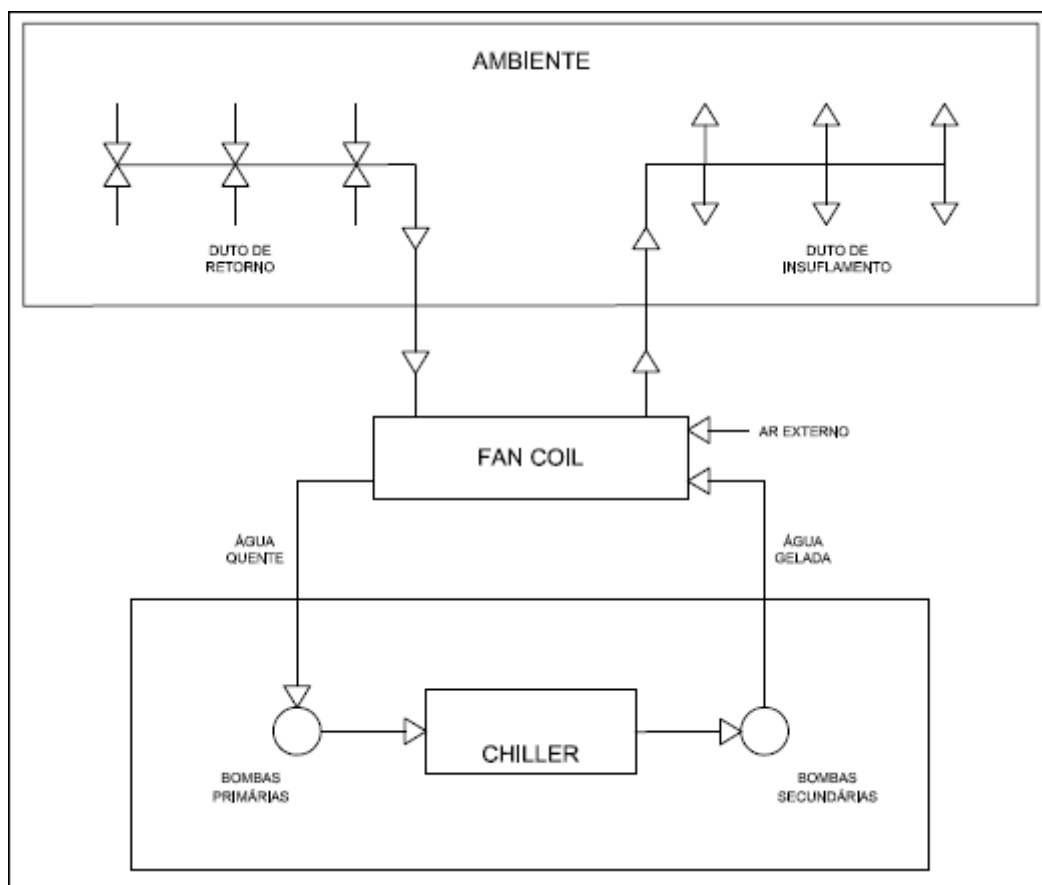
Fonte: Eletrodomésticos (2018).

No sistema de expansão direta, o ar a ser resfriado entra em contato com o fluido refrigerante dentro do equipamento, transferindo calor para o fluido. Com isso o ar é resfriado e distribuído ao ambiente.

No sistema de expansão indireta, temos o uso do chiller e do *fan coil* (equipamento de ar condicionado que utiliza como meio de refrigeração a água gelada, enquanto os condicionadores normais utilizam o gás refrigerante para resfriar diretamente a serpentina). O chiller resfria a água por meio de fluidos refrigerantes e esta é levada para o *fan coil*. Dentro do *fan coil* ocorre a transferência de calor do ar (ar de retorno e ar externo) para a água gelada, tornando o ar mais frio e a água mais quente. A água retorna ao chiller, retomando o processo inicial, e o *fan coil* fica responsável por arrefecer os ambientes por meio de dutos, conforme Figura 2.

O ar insuflado pelos dutos de ar condicionado tem como objetivo retirar calor sensível e latente pré calculado por meio de uma vazão de ar insuflada no ambiente, onde a temperatura do ar deve ser mais baixa que a desejada no ambiente condicionado.

Figura 2 – Esquema de um sistema de ar condicionado por expansão indireta.



Fonte: Autor (2018).

Uma parte do ar insuflado é captado pela rede de dutos de retorno, que tem como função levá-lo até o equipamento, onde será misturado com uma parte do ar externo captado, tratado e retornará para o sistema de insuflamento. Outra parte do ar é captado para ser expelido do ambiente por meio do sistema de dutos de exaustão, com o auxílio de ventiladores e difusores de ar.

Utilizam-se dutos de formatos circular ou retangular, de tamanhos variados, e estes podem ser contínuos, curvados e ramificados. Normalmente são fabricados de chapa de aço ou alumínio e revestidos com um material isolante, mas podem ser confeccionados de outros materiais como plástico, madeira e fibra de vidro.

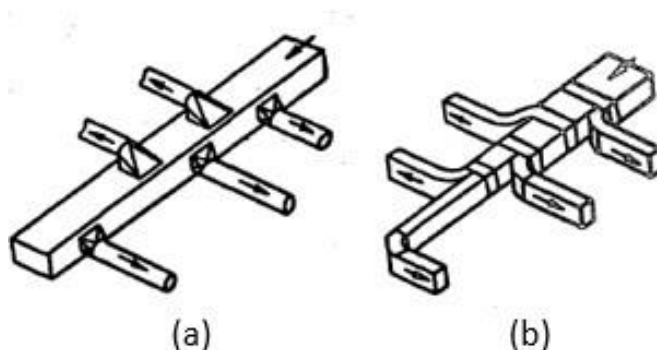
A princípio, o formato circular exige menos material em relação ao duto retangular para ser moldado, mas o formato retangular acaba sendo mais utilizado pela versatilidade nas dimensões, podendo ser instalados em espaços com alturas limitadas.

Existe também a importância da vazão ao longo dos dutos serem constantes para

condicionar o ambiente de maneira uniforme, ou seja, sem que um mesmo espaço a variação de temperatura entre dois pontos distintos seja discrepante, onde um ponto está mais frio do que deveria pelo excesso de ar descarregado, e o outro está a uma temperatura mais elevada pela falta de ar insuflado, causando desconforto térmico em ambas as situações.

Com o intuito de obter uma distribuição de vazão uniforme e menos perdas de carga em sistemas de dutos com várias saídas, IDELCHIK (1966) apresenta um conjunto de valores experimentais que podem ser utilizados, propondo alternativas como diminuir a seção transversal do duto principal a fim de manter a velocidade constante, e arredondar a junção entre o ramo e o duto principal (conforme desenho apresentado na Figura 3b) com o objetivo de diminuir a resistência de passagem de ar oferecida pelos dutos em “T” (conforme desenho apresentado na Figura 3a).

Figura 3 – Duto com seção transversal constante e duto com seção transversal variável



Fonte: Idelchik (1966).

JORENS; VERHAERT; SÖRENSEN (2018) desenvolvem um método para otimizar o projeto de sistema de distribuição de ar em edifícios não residenciais, com o intuito de ajudar os engenheiros projetistas. Para a utilização desse método, formula-se o problema de otimização como um problema matemático, constrói-se uma solução prévia e o algoritmo, implementado por uma linguagem de programação, procura locais onde a solução pode ser melhorada, realizando pequenas alterações. Posteriormente, um *layout* com a rede de duto ideal é gerado.

Os resultados mostram que a utilização desse método tem uma grande influência no custo para a confecção do sistema de distribuição de ar e na pressão do ventilador, mas algumas considerações ainda não são consideradas, como o custo de instalação, que influenciam no valor final da confecção do sistema e perda de carga nos trechos críticos.

CZETANY; SZANTHO; LANG (2017) têm como objetivo em seu trabalho projetar um duto com seções variadas capaz de distribuir o ar uniformemente, que possa ser fabricado facilmente e que se faça desnecessário o uso de *dampers* reguladores de vazão (os *dampers* são acoplados junto com as peças que compõem a linha de duto e regulam a vazão de ar de acordo com a orientação da lâmina). Geometrias otimizadas são obtidas ao desenvolver e resolver numericamente a equação que descreve a geometria ótima do duto. Posteriormente é feito um experimento para validar o modelo teórico. Por fim, o valor de vazão medido no final do duto difere do ideal, apontando como um dos principais motivos para essa diferença o uso do valor da rugosidade do duto como nulo.

2.5. MÉTODO DE VOLUMES FINITOS APLICADO A SIMULAÇÕES DE REDES DE DUTOS

Mesmo com o avanço do método dos elementos finitos em solucionar problemas de mecânica dos fluidos, para problemas mais complexos relacionados a fluxos multifásicos, reativos ou fortemente turbulentos, o método dos volumes se mostra como sendo a única solução na prática (OSSES, 2016).

ESPIG; SILVA (2012) avaliaram a distribuição do ar condicionado dentro de um ônibus de classe rodoviária através da técnica de CFD usando o método de volumes finitos, com o objetivo de proporcionar o conforto térmico aos passageiros. Ao adotar as condições de contorno, realizou-se a simulação e concluiu-se que os parâmetros necessários para atingir o conforto térmico, como a velocidade que o ar circula entre os passageiros, não foram atendidos e foram propostas alterações nos parâmetros de insuflamento de ar.

LU; LU; JIANG (2016) realizaram simulações numéricas por método de volumes finitos em duto uniforme, duto que aumenta a seção transversal e duto que diminui a seção transversal, com o objetivo de observar a deposição de partículas em cada um deles. Essa simulação foi feita pois a deposição de partículas é significativa para o meio ambiente e para a aplicação da engenharia ao observar a influência da variação da seção dos dutos na deposição de partículas. Após realizar a simulação, concluiu-se que a velocidade de deposição de partículas é maior para a rede de duto que reduz a seção transversal ao longo da linha, assim como a intensidade e a vazão quando comparado com a rede de duto que mantém a seção transversal constante.

Apesar do contínuo desenvolvimento dos *softwares*, na maioria das vezes mostra-se necessário validar os resultados obtidos comparando-os com valores experimentais, verificando se os parâmetros inseridos foram adequados.

No artigo de Neto (2011), foi feita uma análise numérica em um sistema de ventilação automotivo com o objetivo de validar o uso da simulação numérica ao comparar os resultados com dados obtidos num trabalho experimental. Os resultados obtidos apresentaram um desvio de 20% aproximadamente que, segundo o autor, foi influenciado principalmente pela diferença na geometria desenhada e na peça fornecida pelo fabricante. As dimensões não eram iguais e tem a presença de componentes a mais na peça física.

GAO *et al.* (2017a), em seu trabalho, propõem o uso de uma nova geometria dos dutos em “T” ao imitar as plantas, alegando que estas possuem um sistema de dutos eficiente. O foco deste trabalho foi encontrar um ângulo de protuberância adequado para alcançar a menor resistência que pode ser oferecida. Ao realizar o experimento em escala real e a simulação numérica através da técnica de FVM, não foi encontrado a melhor geometria para este tipo de duto, mas concluiu-se que, com a protuberância, o duto pode oferecer pelo menos cerca de 20% a menos de resistência na passagem de ar.

GAO *et al.* (2017b), em outro artigo, comparam o novo duto do tipo “T” com outros cinco dutos do mesmo tipo, que são utilizados com mais frequência, por meio de simulação numérica. Um experimento em escala real também foi realizado com o duto não tradicional a fim de comparar os valores teóricos e práticos. Ao perceber que os resultados da simulação são consistentes com os valores experimentais, são feitas simulações em todos os modelos de dutos do tipo “T”. Ao analisar os resultados das simulações, concluiu-se que o novo duto mantém a menor resistência oferecida à passagem de ar sob diferentes valores de vazão.

Nota-se que as simulações numéricas mostram valores condizentes com os reais, podendo ser utilizados como suporte em possíveis experimentos que venham a ser realizados. Mas percebe-se também que qualquer parâmetro inserido incorretamente pode acarretar seriamente os resultados que estão sendo buscados, exigindo coerência ao aplicar as condições de contorno e proximidade da geometria a ser estudada em relação ao modelo real.

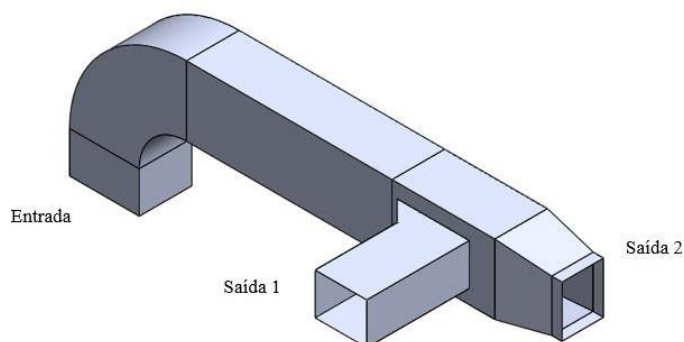
3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

3.1. GEOMETRIA E DEFINIÇÕES

No sistema de dutos abordado, o material utilizado foi o aço galvanizado e as seções têm o formato retangular, variando de uma seção de uma área maior para outras seções de áreas menores, conforme apresentado na Figura 4.

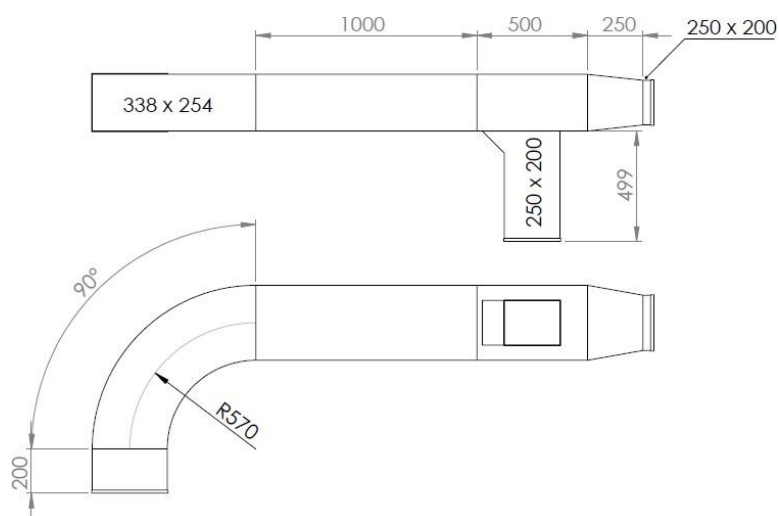
As dimensões da seção na entrada são de 338 mm de altura e 254 mm de largura, na saída 1 as dimensões são de 200 mm de altura e 250 mm de largura e na saída 2 as dimensões são de 250 mm de altura e 200 mm de largura, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 4 – Desenho 3D do duto com identificação.



Fonte: Autor (2018).

Figura 5 – Desenho 2D do duto cotado.



Fonte: Autor (2018).

Para o escoamento interno de ar nos dutos, pode-se calcular o Número de Reynolds por meio das equações (1) e (2):

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (1)$$

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2)$$

sendo ρ é a massa específica do fluido, V a velocidade do fluido, D_h o diâmetro hidráulico, μ a viscosidade do fluido, A a área da seção transversal do duto e P o seu perímetro. Para calcular o Número de Reynolds, considerando o ar a uma temperatura de 15°C na pressão atmosférica padrão (MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 2004), os seguintes dados são utilizados:

- $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$
- $\mu = 17,2 \times 10^{-6} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$
- $V = 8,75 \text{ m/s}$
- $D_h = \frac{4(0,338 \cdot 0,254)}{(2 \times 0,338) + (2 \times 0,254)} = 0,290 \text{ m}$

$$\therefore Re \cong 181,5 \times 10^3 \quad (3)$$

Assim, como o número de Reynolds é superior a 4000, o escoamento é turbulento.

Além disso, pode-se determinar se o escoamento é incompressível ou não através do número de Mach, dado pela seguinte equação:

$$M = \frac{v_o}{v_s} \quad (4)$$

sendo v_o a velocidade de escoamento do ar no duto e v_s a velocidade de propagação do som no ar (340 m/s). Com o mesmo valor de velocidade utilizado para calcular o número de Reynolds, o número de Mach calculado é:

$$M = \frac{8,75}{340} \cong 0,026 \quad (5)$$

Como o número de Mach é inferior a 0,3, o escoamento é incompressível.

Para uma melhor análise do escoamento interno de ar nos dutos, pode-se adotar algumas hipóteses. Apesar de impor limitações, as hipóteses facilitam a resolução do

problema, além de não prejudicar nos resultados obtidos.

As hipóteses adotadas neste trabalho foram:

- Fluido newtoniano;
- As propriedades do fluido (massa específica, temperatura e viscosidade) são constantes;
- A ação das forças de campo é desprezível.

3.2. EQUAÇÕES GOVERNANTES

3.2.1. Princípio de conservação de massa

Ao aplicar o princípio de conservação de massa a um volume de controle, considerando-o como um elemento de volume infinitesimal δV e superfície δS , tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta V} \rho d\vartheta + \int_{\delta S} \rho (\vec{V} \cdot d\vec{S}) = 0 \quad (6)$$

sendo ρ é a massa específica do fluido, $d\vartheta$ o volume infinitesimal, $\vec{V}$ a velocidade absoluta do fluido e $d\vec{S}$ o elemento de área. Utilizando o teorema de Gauss, pode-se obter a equação de continuidade na sua forma diferencial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot (\rho \vec{V})) = 0 \quad (7)$$

Aplicando a propriedade distributiva, temos

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V} \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \vec{V} \equiv \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (8)$$

revelando que a variação da massa específica seguindo a trajetória de uma partícula de fluido é igual ao produto da densidade pelo divergente do campo de velocidade. Isto implica que, no

caso de um escoamento incompressível, onde a massa específica do fluido se mantém constante, a equação da continuidade pode ser escrita como:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (9)$$

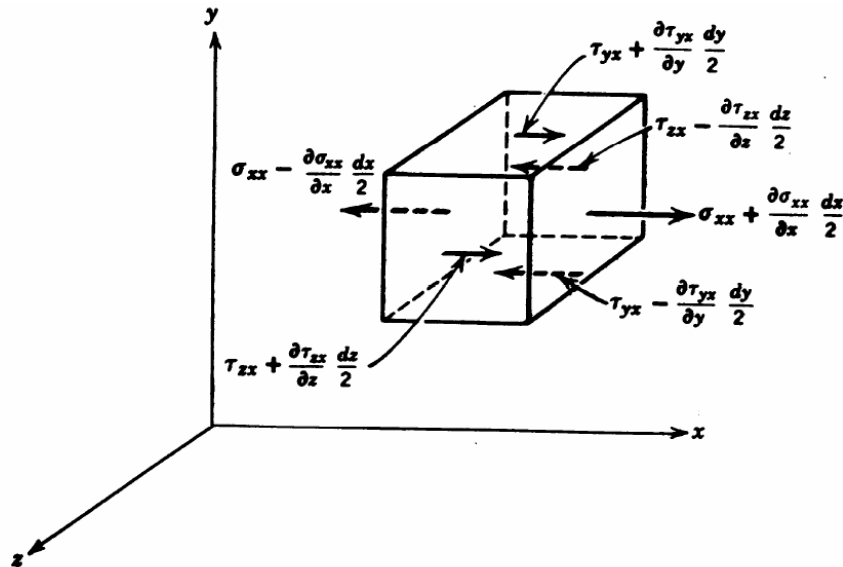
3.2.2. Princípio da conservação da quantidade de movimento linear

Ao analisar as forças atuando nas superfícies do volume de controle de uma partícula de fluido (conforme apresentado na Figura 6), pode-se obter a equação do princípio da quantidade de movimento linear, conhecida como equação de Navier-Stokes que, em sua notação vetorial, pode ser escrita como:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (10)$$

onde $D\vec{V}/Dt$ é a derivada material, $\vec{g}$ é a aceleração gravitacional local, p o campo de pressões, μ a viscosidade, ∇ o operador Nabla e $\vec{V}$ o campo de velocidades.

Figura 6 – Forças atuando no volume de controle infinitesimal



Fonte: Núcleo de engenharia térmica e fluidos (2018).

Como a ação das forças de campo é desprezível, a equação pode ser escrita como:

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu \nabla^2 \vec{V}}{\rho} \quad (11)$$

3.2.3. Princípio da conservação de energia

Em situações onde a condutibilidade térmica é constante e não há fontes volumétricas de calor, a equação da conservação de energia pode ser escrita em termos da temperatura como:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + \phi \quad (12)$$

sendo c_p calor específico a pressão constante, T a temperatura, k a condutividade térmica do fluido e ϕ a função de dissipação viscosa. Adequando a equação, temos:

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \nabla^2 T + \frac{\phi}{\rho c_p} \quad (13)$$

sendo α a difusividade térmica do fluido.

3.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO

O problema abordado está sujeito à condição de parede, a qual estabelece que a componente tangencial da velocidade do fluido (ar), junto à superfície sólida (no caso a parede interna do duto), tem a velocidade desta superfície. As condições de fronteira na superfície sólida podem ser descritas pelas equações

$$\vec{v}_s = v_{sn} \vec{n} + v_{st} \vec{t} \quad (14)$$

$$\vec{v} = v_n \vec{n} + v_t \vec{t} \quad (15)$$

nas quais a equação (14) é a velocidade da superfície ($\vec{v}_s$) composta pelas componentes normal ($v_{sn} \vec{n}$) e tangencial ($v_{st} \vec{t}$), e a equação (15) é a velocidade do fluido ($\vec{v}$)

composta pelas componentes normal ($v_n \vec{n}$) e tangencial ($v_t \vec{t}$). A condição de parede pode ser observada por meio da condição de não escorregamento e da condição de impermeabilidade.

A condição de não escorregamento estabelece que a velocidade da componente tangencial da parede interna do duto seja igual à velocidade da componente tangencial do ar. Sendo assim:

$$v_{st} = v_t \quad (16)$$

A condição de impermeabilidade estabelece que a velocidade da componente normal da superfície seja igual à velocidade da componente normal do fluido:

$$v_{sn} = v_n \quad (17)$$

Na entrada do duto, a condição de contorno é definida pela vazão de entrada ou pela pressão de entrada do fluido.

Nas saídas, a condição estabelecida é de que a pressão estática manométrica seja de 0Pa.

3.4. ADIMENSIONALIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES

A adimensionalização tem como objetivo obter os parâmetros envolvidos no problema abordado, além de permitir uma análise da influência de cada parâmetro adimensional. Uma das vantagens da análise dimensional é a redução do número de variáveis e, conseqüentemente, a redução da complexidade de análises paramétricas, além de extrair tendências a partir de informações que ficariam desorganizadas e incoerentes (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

Os parâmetros característicos a serem utilizados para a adimensionalização do problema são o diâmetro molhado (L), a velocidade do ar (V) e o tempo (L/V).

As equações governantes, quando adimensionalizadas, tomam a seguinte forma:

$$\nabla^* \cdot \vec{V}^* = 0 \quad (18)$$

$$\frac{D\vec{V}^*}{Dt^*} = -\nabla^* p^* + \frac{\nabla^{*2} \vec{V}^*}{Re} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t^*} + (\vec{V}^* \cdot \nabla^*) \theta = \frac{1}{Re \cdot Pr} \nabla^{*2} \theta \quad (20)$$

4 MÉTODO DE SOLUÇÃO

4.1. MÉTODO DE VOLUMES FINITOS

O método de volumes finitos foi introduzido por McDonald, MacCormack e Paullay na década de 1970 e tem sido utilizado para resolver, principalmente, problemas de mecânica dos fluidos (OSSES, 2016). Assim como o Método dos Elementos Finitos, faz uso de pequenos elementos que mostram aproximações dos resultados comparados aos valores obtidos por equações.

No FVM, o princípio de conservação de uma determinada quantidade física expressa pelas equações governantes sobre o volume de controle é o conceito utilizado durante a formulação (GONÇALVES, 2007).

A primeira etapa é a identificação e a decomposição do domínio em volume de controle, e o passo seguinte é a formulação das equações integrais de conservação para cada volume de controle. Depois, aproxima-se numericamente as integrais e os valores das variáveis nas faces e as derivadas com a informação das variáveis nodais. O último passo é a montagem e a resolução do sistema algébrico que foi obtido (ARAUJO, 2017).

As equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia (MALISKA, 1995) escritas no sistema cartesiano são:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S^{u_i} \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S^T \quad (23)$$

e podem ser escritas para um campo escalar geral ϕ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \phi) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \right) + S^\phi \quad (24)$$

onde x_k é o eixo do sistema cartesiano (x, y, z), u_k é a velocidade associada (u, v, w), Γ^ϕ é um coeficiente de difusão e S é um termo fonte.

4.2. SOFTWARE

O *software* comercial escolhido para o desenvolvimento deste trabalho é um programa CAD (*Computer Aided Design*) e possui vários recursos, como modelagem 3D e simulações numéricas. Sendo um programa simples e muito poderoso, permite criar peças com detalhe elevado, assemelhando-se com a realidade, e realizar simulações de diversas naturezas. Para o problema abordado, será utilizado a simulação fluidodinâmica (*flow simulation*) para simular o escoamento interno do ar.

O *software* comercial escolhido resolve um sistema de equações composto pelas equações que expressam os princípios de conservação de massa, quantidade de movimento (Navier-Stokes) e energia, com o objetivo de determinar velocidade, pressão e temperatura. Por fim, o problema é especificado pela geometria, pelos limites e condições iniciais adotadas.

4.2.1. Geração de malhas

A geração de malha é um dos primeiros passos para se obter bons resultados de simulação em uma análise. Como não existe uma equação que resolve todas as geometrias, esse processo divide o modelo a ser analisado em pequenos pedaços, sendo estes de forma e local conhecidos. Posteriormente, são realizados cálculos nos nós, localizados no centroide dos volumes de controle.

Quanto mais refinadas as malhas forem, mais precisos serão os resultados, pois aumentará o número de nós a ser calculado. Em contrapartida aumentará o tempo de resolução dos cálculos por conta desse aumento.

No *software*, os tipos de malhas gerados são as Cartesianas que, junto com a abordagem de Fronteira Imersa (do inglês, *Immersed Boundary – IB*), possibilita minimizar os erros de aproximação, construir operadores com boas propriedades espectrais, aumentando a velocidade de geração de malha e tornando essa geração robusta e flexível. O método de Fronteira Imersa é utilizado para lidar com geometrias que necessariamente não precisam se adequar conforme o eixo cartesiano, facilitando a geração de malha. Outras vantagens são que a complexidade e a qualidade não são afetadas significativamente pela complexidade da geometria, e esse método pode lidar com limites em movimento devido ao eixo cartesiano estacionário não deformado. A malha é formada por um conjunto de células retangulares e células computacionais, cada um com um ou mais volumes de controle. O processo inicial de geração de malha antecipa onde será necessário ter uma malha refinada durante o cálculo para capturar corretamente a física do

escoamento. Geralmente, assume-se que as regiões próximas a arestas vivas, canais estreitos e quaisquer outras áreas relacionadas a características específicas da definição do problema físico (como fontes de calor) precisam ser refinadas (SEHNALEK; ZÁLEŠÁK, 2014).

4.2.2. Condições de contorno

Para a simulação, as seguintes condições de contorno foram adotadas:

- Pressão ambiente na saída dos dutos
- Velocidade na entrada de 21,63m/s (valor médio dos dados medidos na saída do ventilador)
- Temperatura de 305,1 K (valor da temperatura do ar na saída do ventilador, medido com o anemômetro, conforme apresentado na Figura 8).

4.3. EXPERIMENTO

O experimento tem como objetivo validar a simulação realizada, comparando os valores medidos com os da simulação.

O ventilador centrífugo utilizado no experimento foi o ISS-315/3/I/R-90-W, da Projelmec (conforme apresentado na Figura 7), e o instrumento de medição utilizado foi o anemômetro digital MDA-11, da Minipa (conforme apresentado na Figura 8). As características do anemômetro digital são apresentadas na tabela 1.

Inicialmente, ao ligar o ventilador, foram medidos 12 valores de velocidade na saída do equipamento, em pontos distintos (conforme apresentado na Figura 9), com o instrumento de medição. Para a medição dos valores, a hélice do anemômetro deve ser posicionada perpendicularmente à corrente de ar (conforme apresentado na Figura 10).

Figura 7 – Ventilador Centrífugo.



Fonte: Autor (2018)

Figura 8 – Anemômetro digital.



Fonte: Autor (2018)

Tabela 1 – Características do anemômetro digital.

Unidade de medida	Faixa	Precisão	Resolução
Velocidade	0,3m/s - 30,0m/s	$\pm 3\%$ fundo de escala	0,01m/s
Temperatura	20° - 60 °C	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ para 20°C - 0°C e 45°C - 60°C $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para 0°C - 45°C	0,1°C

Fonte: Autor (2018)

Figura 9 – Pontos de medição na saída do ventilador



Fonte: Autor (2018)

Figura 10 – Manuseio do anemômetro



Fonte: Autor (2018)

As peças do duto foram fabricadas pela Heating & Cooling, com dimensões próximas ao desenho. Foram coladas espumas em cada união para minimizar o vazamento de ar ao longo do duto (conforme apresentado na Figura 11) e foram utilizados parafusos para a junção das peças.

Figura 11 – Espumas utilizadas nas uniões das peças.



Fonte: Autor (2018)

Após a montagem das peças, o duto foi acoplado ao ventilador (conforme apresentado na Figura 12).

Figura 12 – Duto acoplado no ventilador.



Fonte: Autor (2018)

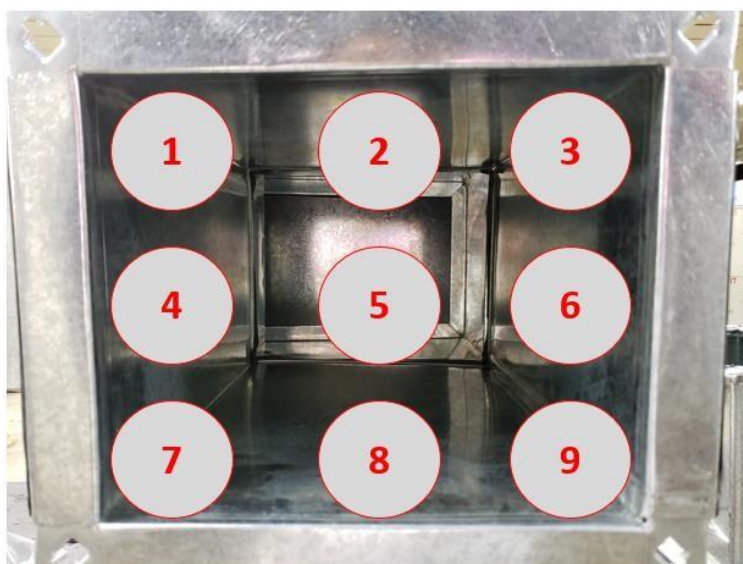
Posteriormente, o equipamento foi novamente acionado. Para coletar os dados nas saídas do duto (identificados conforme apresentado na Figura 13), foram medidos 9 valores de velocidade em pontos distintos (conforme apresentado na Figura 14) em cada uma das saídas.

Figura 13 – Identificação das saídas do duto.



Fonte: Autor (2018)

Figura 14 – Pontos de medição na saída 1 do duto



Fonte: Autor (2018)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após realizar o experimento e a simulação numérica, são analisados os valores de velocidade obtidos nas saídas do duto, a fim de validar o uso do *software* comercial para os projetos de instalação dos dutos.

Os valores medidos experimentalmente nos pontos de cada saída são demonstrados na tabela 2:

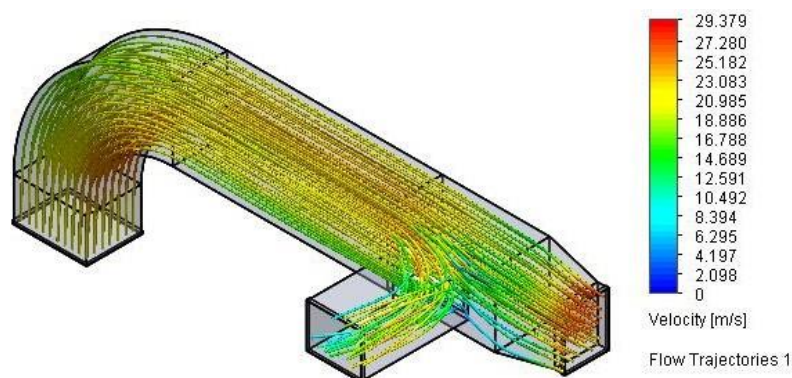
Tabela 2 – Valores obtidos experimentalmente

Ponto	Saída Ventilador [m/s]	Saída 1 [m/s]	Saída 2 [m/s]
1	22,30	2,36	18,56
2	20,96	11,07	19,84
3	22,50	16,67	20,59
4	20,62	3,12	25,46
5	20,76	7,25	26,50
6	24,70	15,97	25,87
7	25,97	7,80	22,48
8	22,40	11,00	19,34
9	26,07	16,41	19,06
10	3,55	-	-
11	3,36	-	-
12	6,26	-	-
Média	21,63	11,00	20,59

Fonte: Autor (2018)

Na figura 15, é mostrado as linhas de corrente do escoamento interno no duto, onde as cores representam diferentes velocidades.

Figura 15 – Linhas de corrente no duto



Fonte: Software comercial (2018).

Após a simulação, um relatório é gerado com os valores das velocidades médias em cada saída, como mostra a tabela 3:

Tabela 3 – Valores de velocidades médias calculados pelo *software*.

Local	Unidade	Valor
Velocidade média na saída 1	m/s	12.268
Velocidade média na saída 2	m/s	25.302

Fonte: Autor (2018)

Ao obter os valores, é preenchida a tabela 4:

Tabela 4 – Comparação dos valores obtidos

	Velocidade na entrada [m/s]	Velocidade na saída 1 [m/s]	Velocidade na saída 2 [m/s]
Valor Experimental	21,63	11,00	20,59
Valor Teórico	21,63	12,27	25,30
Diferença [%]	-	10,34%	18,62%

Fonte: Autor (2018)

Na saída 1, a diferença do valor de velocidade experimental (11,00 m/s) em relação ao valor teórico (12,27 m/s) foi de 10,34%.

Já na saída 2, a diferença do valor de velocidade experimental (20,59 m/s) em relação ao valor teórico (25,30 m/s) foi de 18,62%.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo validar a utilização do *software* comercial para realizar simulação de passagem de ar em um sistema de duto de ar condicionado, apresentando a comparação entre os valores de velocidade média nas saídas do duto. Os valores teóricos foram obtidos com o uso do programa que utiliza o Método dos Volumes Finitos para a discretização do modelo, e os valores experimentais foram obtidos por meio de medições realizados com um manômetro digital.

Apesar das diferenças obtidas em cada uma das saídas não serem próximas, pode-se dizer que a simulação realizada pelo programa mostra valores próximos aos reais, já que existem valores medidos que são superiores em relação ao valor gerado pela simulação.

Devido à grande variação durante as medições realizadas com o anemômetro digital, pode-se utilizar outros meios de medição, como o Tubo de Pitot ou o anemômetro de fio quente, que se mostram mais estáveis nas medições.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, Eduardo. **Métodos numéricos para simulação na engenharia**. ESSS, 2017. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodos-numericos-para-simulacao-na-engenharia/>. Acesso em: 11 maio 2018.
- BLOG DO PORTAL DO ELETRODOMÉSTICO. **A instalação de ar condicionado split**. Disponível em: <http://www.eletrodomesticos.blog.br/a-instalacao-de-ar-condicionado-split>. Acesso em: 11 maio 2018.
- BOLLIGER JÚNIOR, Raul; MARIANI, Antonio Luís C.; **Sistemas de circulação e de distribuição de ar: módulo III – 3 Programa SMACNA de Educação Continuada em Tratamento de Ar**. São Paulo: ABRVA, 2017.
- CZETANY, Laszlo; SZANTHO, Zoltan; LANG, Peter; **Rectangular supply ducts with varying cross section providing uniform air distribution**. Budapest University of Technology and Economics, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116343782>. Acesso em: 11 maio 2018.
- ESPIG, Dayton; SILVA, Cristiano V.; **Simulação numérica do sistema de climatização de ônibus de classe rodoviário**. Erechim: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2012.
- FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J.; MCDONALD, Alan T.; **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- FURLAN, Wilson de Azevedo José Ernesto; **Sistemas Mecânicos**. São Paulo: Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2000.
- GAO, Ran; FANG, Zhiyu; LI, Angui; Liu, Kaikai; YANG, Zhigang; CONG, Beihua; **A novel low-resistance tee of ventilation and air conditioning duct based on energy dissipation control**. Xi'an University of Architecture and Technology, 2017a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117360337>. Acesso em: 16 mar. 2018.
- GAO, Ran; LIU, Kaikai; LI, Angui; FANG, Zhiyu; YANG, Zhigang; CONG, Beihua; **Biomimetic duct tee for reducing the local resistance of a ventilation and air-conditioning system**. Xi'an University of Architecture and Technology, 2017b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317305309>. Acesso em: 16 mar. 2018.
- GONÇALVES, Nelson D. F.; **Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas**. 2007. 71 f. Tese de Mestrado, Departamento de Matemática Aplicada / Departamento de Matemática Pura - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2007.
- IDELCHIK; **Handbook of Hydraulic Resistance**. Springfield: Israel Program for Scientific Translations Ltd., 1966.
- JOSENS, Sandy; VERHAERT, Ivan; SÖRENSEN, Kenneth; **Design optimization of air distribution systems in non-residential buildings**. University of Antwerp, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778818303906>. Acesso em: 25 nov. 2018.
- KESSLER, Martin; **Fluidodinâmica Computacional: O que é?** ESSS. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/fluidodinamica-computacional-o-que-e/>. Acesso em: 24 nov. 2018.

LU, Hao; LU, Lin; JIANG, Yu; **Numerical simulation of particle deposition in duct air flows with uniform, expanding or contracting cross-section.** Hong Kong Polytechnic University, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816306624>. Acesso em: 11 maio 2018.

MALISKA, Clovis R; **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional.** Rio de Janeiro: LTC, 1995.

MUNSON, Bruce R.; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H.; **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos.** 4. ed. São Paulo: Blücher, 2004.

NETO, Dionisio; **Análise Numérica de um Sistema de Ventilação Automotivo.** 2011. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

Núcleo de engenharia térmica e fluidos; **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos.** 2018. 9 f. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

SEHNALEK, Stanislav; ZÁLEŠÁK, Martin; **Evaluation of SolidWorks Flow Simulation by 20Ground-Coupled Heat Transfer Test Cases.** Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265721265_Evaluation_of_SolidWorks_Flow_Simulation_by_ground-coupled_heat_transfer_test_cases. Acesso em: 01 outubro 2018.

OSSES, Juan. **O método de volumes finitos.** ESSS, 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/o-metodo-de-volumes-finitos/>. Acesso em: 24 novembro 2018.