



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA GEOMETRIA
PARA DUTOS DE AR CONDICIONADO**

**Autor: Barbara Santana Rios
Orientador: Luciano Gonçalves Noletto**

**Brasília, DF
2015**



BARBARA SANTANA RIOS

**DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA GEOMETRIA PARA DUTOS DE AR
CONDICIONADO**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Doutor Luciano Gonçalves Noleto

**Brasília, DF
2015**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação

Rios, Barbara.

Desenvolvimento de uma nova geometria para dutos de ar condicionado / Barbara Santana Rios. Brasília: UnB, 2015. 38 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2015. Orientação: Luciano
Gonçalves Noleto.

1. Dutos de ar condicionado. 2. Redução de custos. 3.
Gradientes de pressão I. Noleto, Luciano. II. Doutor.

CDU Classificação



DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA GEOMETRIA PARA DUTOS DE AR CONDICIONADO

Barbara Santana Rios

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 09/12/2015 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noieto, UnB/ FGA
Orientador

Eng. Mecânico Magno de Carvalho, Infraero
Membro Convidado

Eng. MSc. Marcos Gonçalves Noieto, Infraero
Membro Convidado

Profa. Dra. Maria Vitória Duarte Ferrari Tomé, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2015

Esse trabalho é dedicado à minha família que me deu suporte e motivação para chegar ao fim desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitária, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Agradeço à minha família pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Em especial aos meus pais Clélia Margarete Basílio Santana Rios e Pedro Paulo Santana Rios por toda a paciência e confiança dedicada à mim nesses anos longe de casa dedicados ao estudo, além de me darem apoio e incentivo nos momentos de desânimo e cansaço.

Obrigada ao meu irmão Pedro Paulo Santana Rios Filho, às minhas avós Maria Zilmar da Mota e Nair Santana Rios, meus tios, em especial Tio Marco e Tia Cleuba, à tia Nena, às minhas primas Natália Rios e Karol Rios e primos mais próximos que têm cuidado de mim durante esses anos de estudo.

Meus agradecimentos aos amigos de colégio que se fazem presente até hoje e às amizades conquistadas nestes anos de curso, principalmente à Ina Tayane que se mostrou uma grande amiga e que me ofereceu grande suporte nesse final exaustivo e estressante do curso, uma amizade que levarei para a vida toda.

Agradeço a todos os professores por me proporcionarem o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender. Ao meu orientador Professor Luciano Noleto por todo suporte nos artigos publicados bem como na elaboração do presente trabalho.

Aproveito para agradecer à todos os colaboradores da Enerpeixe, pois se fizeram de extrema importância para meu crescimento profissional. Nesta empresa aprendi muitas coisas relacionadas ao setor energético e também valores que levarei para a vida toda. Ao Engenheiro geral da Usina, Eng. Eduardo Bess Ferraz por ter me proporcionado esta experiência e à todos os que me apoiaram nesta fase.

À todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

A persistência é o caminho do êxito – Charles Chaplin

RESUMO

O presente trabalho visa mostrar a influência que a mudança de geometria de dutos de ar condicionado pode ter no escoamento de um duto triangular e um retangular por meio de simulação numérica computacional. Esta mudança visa a redução do custo de fabricação e instalação destes sistemas, considerando a arquitetura e as instalações de fornecimento de energia. Os resultados foram analisados por meio da visualização do escoamento e determinação de gradientes de pressão e velocidade. Estes resultados mostram que ambos os dutos obtiveram semelhante desempenho na análise de pressão e velocidade, não excluindo então a possibilidade de se usar o duto triangular em locais com restrições estruturais, possibilitando contornar estas situações sem que haja aumento do comprimento ou desvios no caminho do duto. Uma análise preliminar de custos mostrou que o material do duto triangular pode chegar a ser 18% mais barato que o retangular, o que pode gerar uma grande economia em grandes obras como a de aeroportos ou shoppings.

Palavras-chave: Dutos de ar condicionado, Redução de custo, gradientes de pressão.

ABSTRACT

This paper aims to show the influence that the air conditioning ducts geometry may have on the flow of a triangular and a rectangular duct through numerical simulation. This change aims to reduce the cost of manufacture and installation of these systems, considering the architecture and power supply facilities. The results were analyzed by flow visualization and measurement of pressure and velocity gradients. These results show that both products obtained similar performance in the pressure and velocity analysis, then not excluding the possibility of using the triangular duct in places with structural restrictions, allowing circumvent these situations without increasing length or deviations in the path of the duct. A preliminary cost analysis showed that the triangular duct material can get to be 18% cheaper than the rectangular, which can lead to big savings in large projects such as airports or shopping malls.

Keywords: Air conditioning ducts, lower costs, pressure gradients.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Motivação	11
1.2. Objetivos.....	12
1.3. Análise das normas.....	12
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO	18
2.1. Artigos relacionados à simulações	18
2.2. Turbulência	20
2.3 Código ANSYS CFX	23
3 METODOLOGIA.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1 Resultados das simulações.....	29
4.2 Análise de custos	33
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	36
BIBLIOGRAFIA.....	37

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Por definição, a eficiência energética consiste da relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua realização. A promoção da eficiência energética abrange a otimização das transformações, do transporte e do uso dos recursos energéticos, desde suas fontes primárias até seu aproveitamento. Adotam-se, como pressupostos básicos, a manutenção das condições de conforto, de segurança e de produtividade dos usuários, contribuindo, adicionalmente, para a melhoria da qualidade dos serviços de energia e para a mitigação dos impactos ambientais (MMA, 2014).

Em estabelecimentos comerciais e residenciais o ar condicionado figura como um dos produtos mais almejado pela população, principalmente no verão, que em muitos lugares seu uso se torna essencial para garantir o conforto e bem estar das pessoas.

No mercado há sempre uma busca por melhora em processos, seja de fabricação, logística, ou outros. Um dos objetivos de se melhorar um processo é diminuir o custo sem que diminua a qualidade do produto. Quando o assunto é ar condicionado, a melhoria de um processo de fabricação para diminuição do custo do produto não pode afetar negativamente a eficiência do equipamento. Isso pode gerar um grande impacto no consumo de energia elétrica, não promovendo a busca por eficiência energética que é tão prezada nos dias de hoje.

O sistema que costumamos chamar de ar condicionado central utiliza um conjunto de máquinas de grande porte. Devido ao seu alto custo, são usados somente em grandes projetos, sendo que em longo prazo são mais eficientes no uso de energia elétrica. Estes utilizam grandes dutos para a distribuição do ar resfriado para os diferentes ambiente.

Os grandes projetos chegam a custar milhões de reais e toda a estrutura de condicionamento ambiental pode chegar a custar 10% do orçamento. Ainda pode-se falar da questão estética do ambiente, em que grandes dutos podem poluir o visual.

Levantou-se então a hipótese de que outros tipos de dutos poderiam ser usados ao invés do convencional duto retangular ou circular.

1.2. Objetivos

O objetivo geral do trabalho é simular o escoamento de um duto triangular e outro triangular e comparar seus resultados afim de se avaliar a possibilidade de redução de custos de instalação destes sistemas. Como objetivos específicos o presente trabalho pretende:

- Comparar o escoamento no interior destes dutos;
- Analisar os custos de montagem e instalação destes dutos;
- Avaliar os possíveis ganhos na utilização do duto triangular.

1.3. Análise das normas

Para um melhor entendimento à cerca das exigências em uma instalação de ar-condicionado foram feitos estudos em cima das normas ABNT NBR 16401-1:2008 e 16401-3:2008, que abrangem padrões a serem seguidos de projeto e qualidade do ar interior, respectivamente.

A idéia inicial das simulações envolvidas neste trabalho buscavam procurar fenômenos no escoamento que pudessem gerar alívios aos ventiladores e conseqüentemente, economia de energia. A norma citada também propõe práticas que buscam favorecer a conservação de energia, tais como:

- Dispositivos de controle e gerenciamento que regulem a capacidade do sistema em função da carga efetivamente existente e mantenham em operação apenas os equipamentos mínimos necessários;
- Distribuição de ar e água em vazão variável que minimize a energia absorvida por ventiladores e bombas;
- Recuperação de calor rejeitado no ar de exaustão ou nos condensadores;
- Aproveitamento das condições externas favoráveis (controle de entalpia da vazão de ar exterior, resfriamento noturno dos ambientes);
- Termoacumulação – onde se armazena carga em água gelada ou gelo durante período de baixo custo de energia, geralmente na madrugada, para ser utilizado durante período de alto custo de energia;
- Refrigeração por absorção, que possibilite o aproveitamento de energia calorífica rejeitada;

- Aproveitamento da energia solar.

A parte 1 da norma se refere à procedimentos de elaboração e documentação do projeto. Nesta parte é abordada também a questão de distribuição do ar, tanto com relação a parte de projeto, quanto a de construção dos dutos. Já a parte 3 tem foco voltado para a qualidade do ar interior. Esta informa quais os fatores afetam a qualidade do ar e quais são determinantes para se ter uma qualidade excelente de ar.

1.3.1 Distribuição do ar – Projeto

Na norma é dito que os dutos devem seguir o caminho mais curto e direto possível, considerando as interferências com a estrutura e as demais instalações e serviços do edifício. Portanto espera-se que o duto tenha a capacidade de superar obstáculos pré-existentes no ambiente de instalação para que se evite criações de desvios.

Recomenda-se também que o duto tronco de insuflação seja ramificado de forma a facilitar o ajuste das vazões e/ou permitir a instalação de dispositivos de controle automático. No capítulo “resultados e discussão”, pode ser visto que nas simulações foram utilizados dutos de seção reta e sem ramificações. Para a análise numérica, só foi considerada as velocidades e pressões na seção do duto tronco. ramificações de insuflamento de ar não foram consideradas.

Em se tratando de dutos metálicos, é citado que estes devem ser constituídos de chapa de aço galvanizado grau B, com revestimento de $250g/m^2$ de zinco. Outros metais podem ser estipulados pelo projetista, desde que o mesmo especifique os requisitos de qualidade e as normas a serem obedecidas.

Apesar de o projeto de detalhamento dos dutos para construção ser de responsabilidade da empresa instaladora, no caso dos dutos metálicos deve-se obedecer estritamente aos requisitos estipulados pela norma, descritos a seguir:

- A espessura da chapa, o tipo e dimensionamento das emendas, das juntas transversais, dos reforços e suportes devem ser determinados como o estipulado no Anexo B da ABNT NBR 16401-1 para os dutos mais usuais, de acordo com a classe de pressão indicada no projeto

para cada trecho de duto, observados o nível de selagem e a classe de vazamento projetados para o sistema;

- Na ausência de detalhes específicos mostrados nos desenhos de projeto, as singularidades devem ser projetadas pela empresa instaladora, a seu critério, de acordo com as recomendações do manual SMACNA – HVAC *duct construction standards*.

O anexo B da norma, engloba as especificações construtivas de dutos metálicos, porém não há dados para dutos triangulares, somente retangulares, circulares e ovalizados. Consultando o SMACNA – HVAC também não foram encontradas informações pertinentes à dutos triangulares.

1.3.2 Qualidade do ar interior

O sistema de ar-condicionado controla a qualidade do ar interior por meio de renovação por ar exterior e pela filtragem de todo o ar insuflado. Renovação esta que reduz a concentração de poluentes gasosos, biológicos e químicos, que não são retidos nos filtros. A filtragem do ar procura reduzir a concentração de poluentes trazida do ambiente exterior e também dos poluentes gerados internamente, evitando que estes se acumulem no sistema.

Tabela 1 – Vazão eficaz mínima de ar exterior para ventilação

Local	D Pessoas/ 100 m ²	Nível 1		Nível 2		Nível 3	
		F _p	F _a	F _p	F _a	F _p	F _a
Edifícios públicos							
Aeroporto – Saguão	15	3,8	0,3	5,3	0,4	5,7	0,5
Aeroporto – sala de embarque	100	3,8	0,3	5,3	0,4	5,7	0,5
Biblioteca	10	2,5	0,6	3,5	0,8	3,8	0,9
Museu, galeria de arte	40	3,8	0,3	5,3	0,4	5,7	0,5
Local de culto	120	2,5	0,3	3,5	0,4	3,8	0,5
Legislativo – plenário	50	2,5	0,3	3,5	0,4	3,8	0,5
Teatro, cinema, auditório -	150	2,5	0,3	3,5	0,4	3,8	0,5

lobby							
Teatro, cinema, auditório e platéia	150	2,5	0,3	3,5	0,4	3,8	0,5
Teatro, cinema, auditório - palco	70	5	0,3	6,3	0,4	5,7	0,5
Tribunal – sala de audiências	70	2,5	0,3	3,5	0,4	3,8	0,5

Na tabela 1 são estipulados valores de vazão mínima de ar exterior para que se atinja uma qualidade aceitável a ser suprida pelo sistema de ventilação. Estas vazões estão estipuladas nas normas e foram dimensionadas considerando poluentes biológicos, físicos e químicos esperados nos ambientes descritos que estejam em condições normais de ocupação e utilização. Onde:

- nível 1 - é o mínimo de vazão de ar exterior para ventilação;
- nível 3 - é o nível em que segundo estudos, existem evidências de redução de reclamações e manifestações alérgicas; F_p (L/s**pers*) é a fração do ar relacionada às pessoas e F_a (L/s*m²) é a fração do ar relacionada ao recinto.

1.3.3 Resolução 09 da ANVISA

No Brasil, o órgão que faz o acompanhamento das instalações de ar condicionado é a ANVISA e na resolução 09 pode-se encontrar recomendações de padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados de uso público e coletivo.

1.3.3.1 – O Valor Máximo Recomendável - VMR, para contaminação microbiológica deve ser $\leq 750 \text{ ufc/m}^3$ de fungos, para a relação I/E $\leq 1,5$, onde I é a quantidade de fungos no ambiente interior e E é a quantidade de fungos no ambiente exterior.

NOTA: A relação I/E é exigida como forma de avaliação frente ao conceito de normalidade, representado pelo meio ambiente exterior e a tendência epidemiológica de amplificação dos poluentes nos ambientes fechados.

- Quando o VMR for ultrapassado ou a relação I/E $> 1,5$, é necessário fazer um diagnóstico de fontes poluentes para uma intervenção corretiva.

- É inaceitável a presença de fungos patogênicos e toxigênicos.

1.3.3.2 – Os Valores Máximos Recomendáveis para contaminação química são:

- $\leq 1000 \text{ ppm}$ de dióxido de carbono – (CO_2), como indicador de renovação de ar externo, recomendado para conforto e bem-estar.
- $\leq 80 \text{ mg/m}^3$ de aerodispersóides totais no ar, como indicador do grau de pureza do ar e limpeza do ambiente climatizado.

NOTA: Pela falta de dados epidemiológicos brasileiros é mantida a recomendação como indicador de renovação do ar o valor = 1000 ppm de Dióxido de carbono – CO_2 .

1.3.3.3 – Os valores recomendáveis para os parâmetros físicos de temperatura, umidade, velocidade e taxa de renovação do ar e de grau de pureza do ar, deverão estar de acordo com a NBR 6401 – Instalações Centrais de Ar Condicionado para Conforto – Parâmetros Básicos de Projeto da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

- a faixa recomendável de operação das Temperaturas de Bulbo Seco, nas condições internas para verão, deverá variar de 23°C a 26°C , com exceção de ambientes de arte que deverão operar entre 21°C e 23°C . A faixa máxima de operação deverá variar de $26,5^\circ\text{C}$ a 27°C , com exceção das áreas de acesso que poderão operar até 28°C . A seleção da faixa depende da finalidade e do local da instalação. Para condições internas para inverno, a faixa recomendável de operação deverá variar de 20°C a 22°C ;
- a faixa recomendável de operação da Umidade Relativa, nas condições internas para verão, deverá variar de 40% a 65%, com exceção de ambientes de arte que deverão operar entre 40% e 55% durante todo o ano. O valor máximo de operação deverá ser de 65%, com exceção das áreas de acesso que poderão operar até 70%. A seleção da faixa depende da finalidade e do local da instalação. Para

condições internas para inverno, a faixa recomendável de operação deverá variar de 35% a 65%;

- o Valor Máximo Recomendável - VMR de operação da Velocidade do Ar, no nível de 1,5m do piso, na região de influência da distribuição do ar é de menos 0,25 m/s;
- a Taxa de Renovação do Ar adequada de ambientes climatizados será, no mínimo, de $27 \text{ m}^3/\text{hora}/\text{pessoa}$, exceto no caso específico de ambientes com alta rotatividade de pessoas. Nestes casos a Taxa de Renovação do Ar mínima será de $17 \text{ m}^3/\text{hora}/\text{pessoa}$, não sendo admitido em qualquer situação que os ambientes possuam uma concentração de CO_2 , maior ou igual a estabelecida em 1.3.3.2 deste trabalho;
- a utilização de filtros de classe G-1 é obrigatória na captação de ar exterior. O Grau de Pureza do Ar nos ambientes climatizados será obtido utilizando-se, no mínimo, filtros de classe G-3 nos condicionadores de sistemas centrais, minimizando o acúmulo de sujidades nos dutos, assim como reduzindo os níveis de material particulado no ar insuflado.

Os padrões referenciais adotados complementam as medidas básicas definidas na Portaria GM/MS n.º 3.523/98, de 28 de agosto de 1998, para efeito de reconhecimento, avaliação e controle da Qualidade do Ar Interior nos ambientes climatizados. Deste modo poderão subsidiar as decisões do responsável técnico pelo gerenciamento do sistema de climatização, quanto a definição de periodicidade dos procedimentos de limpeza e manutenção dos componentes do sistema, desde que asseguradas as freqüências mínimas para os seguintes componentes, considerados como reservatórios, amplificadores e disseminadores de poluentes.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Para se obter soluções computacionais para as equações de conservação de grandezas físicas envolvidas em um determinado escoamento é utilizado um grupo de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais chamadas de *Computational Fluid Dynamics* (CFD – Fluidodinâmica computacional). CFD faz parte da grande área de simulação e esta é importante pois pode prever detalhes ou impossibilidades do experimento, bem como vir a diminuir drasticamente os custos envolvidos em um experimento real. A ferramenta CFD auxilia na busca de soluções para problemas reais, porém é importante reconhecer que há limitações mesmo que todos os dias a tecnologia avance para que se melhore cada vez mais a precisão dessa ferramenta (LUIZ, 2007).

Para cumprir os objetivos propostos pelo presente trabalho, será feito o uso da fluidodinâmica computacional a fim de se avaliar a viabilidade da mudança de seção de duto por simulação. Assim evitando que experimentos futuros sejam executados sem saber o que esperar dos resultados que serão obtidos. Foram encontrados na literatura diversos artigos em que se usa CFD para prever acontecimentos, fazer estudos de velocidade e pressão em diversas situações, entre outras aplicações

Visando demonstrar a aplicabilidade da simulação computacional, serão descritos os resultados de alguns artigos que utilizaram dessa metodologia para a análise de seus problemas, bem como um estudo da bibliográfico acerca do tipo de simulação envolvida neste trabalho.

2.1. Artigos relacionados à simulações

No artigo de MOUJAES e AEKULA (2009), foram feitas previsões numéricas de fluxo de ar e distribuição da pressão em dois dutos cotovelos comumente usados, a simulação usou treze números de Reynolds diferentes. Foram simulados e comparados dois tipos de dutos, um circular e um retangular, com palhetas giratórias e sem palhetas giratórias. Comparando os cotovelos com pás e sem pás, houve uma diferença de pressão (queda) de até 35 Pa, em que os modelos com pás apresentaram melhor desempenho, demonstrando grande importância na redução da má distribuição da velocidade. Os resultados deste artigo concluem que o CFD é

muito importante para a área preditiva indicando que os modelos CFD podem ser bem aplicados em áreas HVAC.

MOUJAES e GUNDAVELLI (2012), fizeram simulações CFD de vazamento em dutos de HVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado, ou *Heating, Ventilation, and Air Conditioning*, em inglês) residencial. Foram construídas seis áreas distintas com vazamento de ar (furos quadrados, retangular, circular e elípticos) e analisadas com cinco diferentes números de Reynolds. Pôde ser deduzido a partir deste estudo base que a queda de fluxo e pressão característica de diversas geometrias de vazamento pode ser simulada dando os valores de C (coeficiente de vazão), n (expoente de pressão) e valores “*k-factor*” (foi encontrado que eles são uma função da geometria, em contraste com o habitual fórmula que expressa em termos de perda de pressão estática e velocidade média através do vazamento). Este estudo determinou taxa de fugas locais nas seções dos dutos, o que pode ajudar a futuros pesquisadores da área no fornecimento de novas informações para que eles possam caracterizar fugas do campo.

Os autores BALAGANDHAR e ROY (2001) realizaram um estudo da sensibilidade do design e a otimização de sistemas fluido-térmico constantes em dois tipos de análises. No estudo da sensibilidade do design de uma aleta “*axi-symmetric*”, os resultados finais mostraram uma considerável redução de temperatura da parede interna do design original para o design “ótimo”. Já no estudo sobre otimização de dutos de HVAC, foram feitas análises de nove diferentes dutos, em que os dutos ótimos reduzem a pressão em quase duas unidades e requerem 25% menos energia, enquanto mantém a mesma taxa de fluxo.

GOWREESUNKER, TASSOU e KOLOKOTRONI (2013) realizam simulações de avaliação de um sistema de ventilação de deslocamento (DV) no desempenho energético em um salão de embarque do aeroporto. As simulações consistem em um sistema de ventilação com um difusor DV convencional e outro com o difusor adaptado com uma mudança de fase no permutador de calor de armazenamento de material (PCM-HX). Os resultados mostram que: o sistema de ventilação de deslocamento é mais eficiente para o arrefecimento do aquecimento de um espaço; a adição de um sistema PCM-HX reduz as exigências de energia de aquecimento durante os períodos intermediários e de verão para noite específica, enquanto a energia para aquecimento de inverno permanece inalterada; o PCM-HX reduz os

requisitos de energia de refrigeração; e com a implantação do PCM-HX ao difusor adaptado, obtiveram uma máxima economia de energia de 34%.

Os autores WAHLQVIST e HEES (2013), fazem uma validação de FDS (Simulador Dinâmico de fogo, ou *Fire Dynamics Simulator*) para grande escala em cenários de incêndios bem confinados, sob ventilação mecânica com ênfase em prever o comportamento do sistema de ventilação. A possibilidade de simular uma sala de fogo hermeticamente fechado conectado a uma rede de ventilação mecânica utilizando FDS foi demonstrada com sucesso. Porém, o FDS falhou na previsão de magnitudes de pico de pressão e conseqüentemente a magnitude da resposta do sistema de ventilação. Segundo os autores o erro parece ser ligado a algumas discrepâncias nos dados experimentais.

Percebe-se que as simulações computacionais oferecem suporte em futuros experimentos já que podem ajudar na previsão de acontecimentos. Além de estar suscetíveis à erros de simulações, seja por falha humana na inserção de dados, ou seja por incapacidade do software para simulações de maior complexidade.

Visto que a simulação de ar em dutos envolve escoamento turbulento de um fluido, este capítulo também visa apresentar algumas explicações e equações envolvidas no processo de solução do problema de turbulência, bem como o funcionamento do código ANSYS-CFX.

2.2. Turbulência

Um regime turbulento é caracterizado por um escoamento com elevados graus de liberdade. Esse tipo de escoamento é instável e possuem flutuações que variam no espaço e tempo. Sistemas com essa característica tendem a apresentar um comportamento caótico (SILVEIRA-NETO, 2002).

Considerando-se a característica de imprevisibilidade de um regime turbulento, tem-se que a turbulência pode ser estudada por várias frentes, dentre elas, a experimentação em laboratório e a simulação numérica. Sabe-se que a simulação numérica avança juntamente com a tecnologia computacional e esta é a frente utilizada neste trabalho. Para representar a turbulência do escoamento, aplicam-se sobre as equações de conservação a decomposição de Reynolds (RANS

– *Reynolds Average Navier-Stokes* e URANS – *Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes* ou Equações Médias Transiente de Reynolds).

Como condição inicial do escoamento, é considerado que este é incompressível e isotérmico, resultando nas simplificações previamente aplicadas às equações que aqui serão descritas.

2.2.1 Modelo de Turbulência SST (Shear Stress Transport)

Os estudos de turbulência em escoamentos são complexos e para sua análise, utilizam-se de diferentes modelos matemáticos, tais como modelo Zero Equation, modelo $k-\varepsilon$, modelo $k-\omega$, e modelo SST, os quais podem ser diferenciados pela maneira na qual eles prescrevem a viscosidade e a difusividade de turbulência (MENTER; KUNTZ, 2003). Menter criou o modelo SST (*Shear Stress Transport*) que é uma junção entre dois tipos de modelo ($k-\varepsilon$ e $k-\omega$), extraíndo o melhor possível da formulação de cada modelo para uma análise mais minuciosa do escoamento, pois visa contornar os problemas de cada um dos modelos.

No modelo $k-\varepsilon$, k representa a energia cinética de turbulência e ε é a dissipação turbulenta. Este tipo de formulação é mais utilizada na região longe da parede e mesmo não descrevendo com realidade algumas situações relacionadas às físicas do sistema, este é um dos modelos mais utilizados em simulações de escoamentos turbulentos (POPE, 2011).

No modelo $k-\omega$, assim como no modelo $k-\varepsilon$, k representa a energia cinética de turbulência e ω é a frequência turbulenta. O $k-\omega$ é o modelo utilizado para descrever o interior da camada limite. Além disto, é muito conhecido por sua estabilidade numérica (WILCOX, 1993). Sabe-se que este modelo tem um comportamento muito superior ao do modelo $k-\varepsilon$ no interior da região logarítmica em escoamentos com gradientes adverso de pressão e em escoamentos compressíveis (MENTER; KUNTZ, 2003).

Para que a iteração entre os modelos $k-\omega$ e $k-\varepsilon$ funcione, multiplica-se o modelo $k-\varepsilon$ por uma função de mistura. Impõe-se que a função de mistura tenha valor unitário no interior da camada limite e, gradativamente, torne-se nula fora da mesma (NOLETO, 2012).

As equações de transporte desse modelo são:

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = P_k - \beta' k \omega \rho + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (2.1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_i \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) = \alpha \rho S^2 + \beta \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_\omega + \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2.2)$$

Esse modelo apresenta a viscosidade turbulenta, que é definida de modo a considerar o transporte das tensões cisalhantes principais turbulentas, e se encontra evidenciado na equação (2.3).

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, (S_{ij} S_{ij})^{\frac{1}{2}} F_2)} \quad (2.3)$$

Onde $(S_{ij} S_{ij})$ é uma medida invariante da taxa do tensor taxa de deformação e F_2 uma função de mistura. As funções de mistura F_1 e F_2 são baseadas nas variáveis do escoamento e na distância até a parede.

Estas funções têm como característica a delimitação das zonas onde cada modelo irá atuar. Por meio dos valores encontrados para as funções, o modelo irá mudar a formulação nas equações de transporte. Assim, F_1 e F_2 são mostradas nas equações seguintes (MENTER; KUNTZ; LANGTRY, 2003).

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (2.4)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4k}{CD_{k\omega} \sigma_{\omega 2} y^2} \right] \quad (2.5)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2 \frac{1}{\omega \sigma_{\omega 2}} \nabla k \nabla \omega, 1,0 \times 10^{-10} \right) \quad (2.6)$$

F_1 é igual a zero na região afastada da parede e muda para 1 na região perto da parede. F_2 é dada por:

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (2.7)$$

$$\arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \quad (2.8)$$

Para evitar um acúmulo de turbulência em regiões de estagnação, utiliza-se um limitador de produção, apresentado nas equações (2.9) e (2.10) (MENTER; KUNTZ; LANGTRY, 2003).

$$P_k = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.9)$$

$$\overline{P}_k = \max(P_k, 10 \cdot \rho \beta^* k \omega) \quad (2.10)$$

A porção de contribuição de cada modelo, que é representada pelas constantes α , é expressa na equação (2.11) (MENTER; KUNTZ; LANGTRY, 2003).

$$\alpha = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 (1 - F_1) + \dots \quad (2.11)$$

As constantes desse modelo são $\beta' = 0,09$, $\alpha_1 = 5/9$, $\beta_1 = 3/40$, $\alpha_{k1} = 0,5$, $\sigma_{\omega 1} = 0,5$, $\alpha_2 = 0,44$, $\beta_2 = 0,0828$, $\sigma_{k2} = 1$, $\sigma_{\omega 2} = 0,856$ (MENTER; KUNTZ; LANGTRY, 2003).

Nas Equações (2.5) e (2.8), y é a distância mais próxima da parede. Descrições mais aprofundadas acerca das funções de mistura podem ser encontradas em Menter e Kuntz (2003).

O modelo SST é vantajoso pois garante uma seleção conveniente dos modelos k- ϵ e k- ω , evitando que comportamentos deficitários de cada modelo transpareçam.

2.3 Código ANSYS CFX

O ANSYS-CFX é o software utilizado no presente trabalho e seu código utiliza a metodologia de volumes finitos baseado em elementos. O programa CFX consiste de um número de módulos: geometria (*Design Modeler*), geração da malha (*CFX-Mesh*), setup do modelo (*CFX-Pré*), solução (Solver) e Pós-Processamento ou gráfico (*CFX-Pós*). Estes, aliados ao Workbench, contribuem para um ambiente de simulação organizado e de melhor compreensão das informações.

2.3.1 Criação da Geometria

Através da plataforma *Workbench* da ANSYS, é permitida uma grande iteração com os principais sistemas de criação e edição de geometrias CAD, além de permitir a criação de geometrias em um ambiente próprio do software ANSYS, o *Design Modeler*. Definindo então o domínio a ser estudado.

2.3.2 Geração da Malha

O método dos volumes finitos baseado em elementos transforma as equações de Navier-Stokes incompressíveis, que são equações diferenciais parciais, em um conjunto de equações algébricas (MALISKA, 2003). Fazendo com que se passe do nível contínuo, para nível discreto (Fig. 2.1). Essa transformação é feita por meio de integração das equações diferenciais parciais em que se obtém n equações algébricas lineares com n incógnitas. Cada incógnita está definida para um nó. Detalhes mais profundos sobre este método e a cerca das funções utilizadas, encontram-se em Maliska (2003) e Rezende (2008).

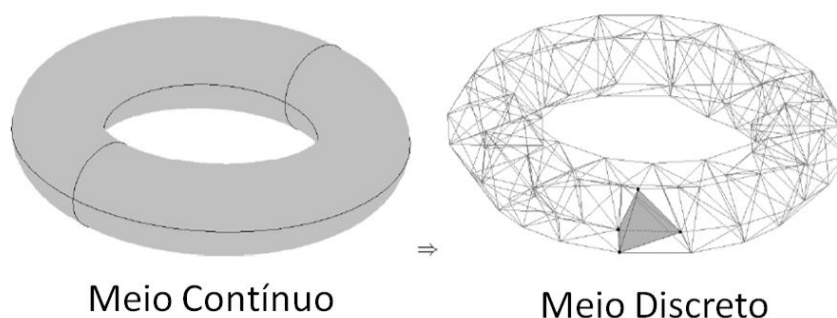


Figura 2.1. Processo de Discretização.

Por meio da malha que envolve a geometria a ser analisada é feita a discretização do objeto. Na figura 2.1 encontra-se um triângulo cinza desenhado no meio discreto, este triângulo é chamado de volume de controle. A malha é formada pelo conjunto dos volumes de controle. Cada parte da malha é chamada de elemento, que é o que cobre todo o domínio sem sobreposição e sem espaços vazios.

2.3.3 Pré-Processamento (*CFX-Pré*)

Na etapa de pré-processamento é definido:

- Propriedade dos fluidos;
- Condições da estrutura (quando existirem);
- Condições de contorno.

Adentrando ao equacionamento envolvido na definição das condições de contorno, temos que a velocidade é imposta na entrada do domínio, *inlet*. Tanto o módulo do vetor velocidade pode ser aplicado na condição de contorno de entrada como também os componentes da velocidade. Para escoamentos turbulentos, também prescreve-se os valores de quantidades turbulentas, baseadas na intensidade de turbulência:

$$I = \frac{u'}{u} \quad (2.12)$$

$$k = 1,5I^2u_n^2 \quad (2.13)$$

$$u_n = u_{inlet}n \quad (2.14)$$

$$\mu_T = 1000I_\mu \quad (2.15)$$

Em que u_n indica a velocidade normal à parede, u indica a velocidade imposta na condição de contorno e n indica o vetor normal unitário.

A condição de saída adotada pelo presente trabalho (*outlet*) é utilizada quando se sabe que ali somente haverá saída de fluido. Quando conhecida, a velocidade desejada de saída é inserida na condição de contorno de saída. A restrição apresentada na equação 2.16 tem por objetivo proporcionar a estabilidade do cálculo, de modo a forçar o gradiente de velocidade normal à fronteira a ser nulo (Rezende, 2008).

$$p \pm 0,5\rho u_n^2 = p_{est} \quad (2.16)$$

Para este trabalho foi utilizada a condição de não escorregamento nas faces das paredes, em que o modelo SST atua por meio das suas funções de mistura. É válido ressaltar que as condições acima descritas são impostas na face do elemento e não no nó.

2.3.4 Processamento (*Solver*) e Pós-Processamento (*CFX-Pós*)

Segundo Silva (2006) e Versteeg e Malalasekera (1995), no momento de processamento da simulação são implementadas as técnicas numéricas de solução em conjunto com os parâmetros definidos na etapa de pré-processamento e seguem as etapas subsequentes.

- Aproximação das incógnitas por funções simples;
- Discretização das equações governantes do escoamento pela substituição das aproximações das incógnitas, procedendo-se manipulações algébricas;
- Linearização do sistema de equações algébricas resultante;
- Definição da estratégia de solução do sistema obtido;
- Solução do sistema.

No pós-processamento pode-se visualizar os resultados obtidos na etapa de processamento em forma de gráficos, vetores estáticos e até mesmo animações, bem como exportar alguns dados para outros softwares.

É um programa de alta performance para predição de escoamento laminar e turbulento, e transferência de calor, massa e reações químicas, com modelos extras, como, escoamento multifásico, transporte de partículas e combustão, o que oferece bastante versatilidade na resolução de problemas.

BIBLIOGRAFIA

ABNT, Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 1 – Projetos das instalações, NBR 16401-1/2008.

ABNT, Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 3 – Qualidade do ar interior, NBR 16401-3/2008.

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Qualidade do ar interior. Resolução nº 9, de 16 de janeiro de 2003. D.O.U de 20 de janeiro de 2003.

Balagangadhar, D. Roy, S. Design sensitivity analysis and optimization of steady fluid-thermal systems. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 190 (2001).

Gowreesunker, B. L., Tassou, S. A., Kolokotroni, M. Coupled TRNSYS-CFD simulations evaluating the performance of PCM plate heat exchangers in an airport terminal building displacement conditioning system, *Building and Environment*, Volume 65, July 2013, Pages 132-145.

Luiz F., <http://www.notasemcfd.com/2007/06/o-que-cfd-e-para-que-isso-serve.html>, 2007, acesso em 20 de Agosto de 2015.

Maliska, C. R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, volume 2. Editora LTC, 2003.

Menter, F. R., Kuntz, M. Development and application of a zonal des turbulence model for cfx 5. Ansys cfx validation report, 2003.

Menter, F. R., Kuntz, M., e Langtry, R. Ten years of industrial experience with the sst turbulence model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 4, 2003.

Ministério do Meio Ambiente, <http://www.mma.gov.br/clima/energia/eficiencia-energetica>, acesso em 20 de Maio de 2014.

Moujaes, S. F., Aekula, S. CFD Predictions and Experimental Comparisons of Pressure Drop Effects of Turning Vanes in 90° Duct Elbows. *Journal of Energy Engineering*, December 2009.

Moujaes, S. F., Gundavelli, R. CFD simulation of leak in residential HVAC ducts, *Energy and Buildings*, Volume 54, November 2012, Pages 534-539.

Noletto, L. G. INOVATRANS – Inovação de Micro Centrais Hidrelétricas: Capacitação Laboratorial e Transferência de Tecnologia, Relatório individual de pesquisa, 2012.

ORSE – Sistema de orçamento de obras de Sergipe - <http://www.cehop.se.gov.br/orse/> - Acessado em Julho de 2015.

Pope, S. B. *Turbulent Flows*. 9. Ed. Cambridge University Press, 2011.

Rezende, R. V. P. Modelagem Matemática e Desenvolvimento de Metodologia Computacional para Simulação Numérica do Escoamento Bifásico de Ar e Ferro-Gusa em Canal de Corrida de Alto Forno, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

Silva, M. K. Estudo de Modelagem Numérica Tridimensional de Ciclones do Tipo Lapple para Separação Gás-Sólido. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Química

– Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, fev. 2006.

Silveira-Neto, A. Fundamentos da turbulência nos fluidos. In Freire, A. P. S., Menut, P., e Su, J., editors, Turbulência, volume 1, pages 3-48. ABCM, 2002.

Versteeg, H. K.; Malalasekera, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The finite Volume Method [S.1.]: Longman Scientific Technical, 1995. ISBN 0-582-21884-5.

Wahlqvist, J. Hees P. v. Validation of FDS for large-scale well-confined mechanically ventilated fire scenarios with emphasis on predicting ventilation system behavior, Fire Safety Journal, Volume 62, Part B, November 2013, Pages 102-114.

Wilcox, D. C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, 1 edition, 1993.