

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**RICARDO ALVES JUNQUEIRA**

**SIMULAÇÃO EM CONFORTO TÉRMICO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUARAPUAVA**

**2018**

**RICARDO ALVES JUNQUEIRA**

## **SIMULAÇÃO EM CONFORTO TÉRMICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Guarapuava.

Orientador: Profa. Dra. Raquel da Cunha Ribeiro da Silva

**GUARAPUAVA**

**2018**

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Simulação em Conforto Térmico

Ricardo Alves Junqueira

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em Guarapuava, Paraná na data 15 de junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Raquel da Cunha Ribeiro da Silva  
Prof. Orientador

---

Paúl Adrian Delgado Maldonado  
Membro Da Banca

---

Jéssica Hipolito de Vasconcelos  
Membro Da Banca

---

Aldo Przybysz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

“Talvez não tenha conseguido fazer  
o melhor, mas lutei para que o  
melhor fosse feito. Não sou o que  
deveria ser, mas Graças a Deus não  
sou o que era antes”.  
(Marthin Luther King)

## RESUMO

JUNQUEIRA, Ricardo Alves. **Simulação em Conforto Térmico**. 2017. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica). Dissertação (Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2018.

A revisão da literatura a respeito de conforto térmico aponta que existem diversos estudos relacionados a conforto térmico, adequação ou tentativa de se propor um modelo o qual se adeque a todos os ocupantes de um edifício. É neste sentido que este trabalho se desenvolve, tendo como objetivo determinar uma zona de conforto térmico para alunos da Universidade Tecnológica do Paraná do município de Guarapuava, PR, Brasil. A área a ser estudada corresponde a um mini auditório, onde geralmente possui uma média grande de alunos durante seu uso, onde foi notado que existem alguns estudos relacionados ao conforto de pessoas neste tipo de atividade. O trabalho se baseia em diferentes normas e documentos científicos as quais validam o conforto térmico da maior parte da população brasileira, realizando os ajustes necessários para adequação às condições do público citado. O presente estudo traz resultados de medições ambientais, apresenta resultados de pesquisa verificando a sensação térmica no ambiente de estudo e por fim, através da simulação determinar se o ambiente dispõe de equipamentos necessários para disponibilizar a sensação de conforto térmico para seus ocupantes.

**Palavras-chave:** Conforto térmico. Ar condicionado. Carga térmica.

## ABSTRACT

JUNQUEIRA, Ricardo Alves. **Simulation of Thermal Comfort**. 2017. 61 p. Term Paper (Bachelor Degree of Mechanical Engineering). Dissertation (Mechanical Engineering) – Federal Technological University of Paraná. Guarapuava, 2018.

The review of the literature on thermal comfort indicates that there are several studies related to thermal comfort, adequacy or attempt to propose a model that fits all occupants of a building. It is in this sense that this work is developed, aiming to determine a zone of thermal comfort for students of the Technological University of Paraná of the city of Guarapuava, PR, Brazil. The area to be studied corresponds to a mini auditorium, where it usually has a large average of students during its use, where it was noticed that there are some studies related to the comfort of people in this type of activity. The work is based on different norms and scientific documents that validate the thermal comfort of the majority of the Brazilian population, making the necessary adjustments to suit the conditions of the cited public. The present study brings results of environmental measurements, presents research results verifying the thermal sensation in the study environment and, finally, through the simulation determines if the environment has the necessary equipment to provide the thermal comfort sensation to its occupants.

**Keywords:** Thermal Comfort. Air conditioner. Thermal load.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mecanismos de perda de calor para o ambiente .....	12
Figura 2 - Variáveis do Conforto Térmico.....	20

Figura 3 - Gráfico que relaciona PMV e PPD .....	31
Figura 4 – Planta mini auditório .....	36
Figura 5 – Planta baixa mini auditório .....	43
Figura 6 – Geometria utilizada na simulação .....	43
Figura 7 – Dimensões utilizadas no projeto .....	44
Figura 8 – Malha utilizada na simulação .....	45
Figura 9 – Superfícies determinadas .....	46
Figura 10 – Superfícies determinadas .....	46
Figura 11 – Iterações realizadas .....	48
Figura 12 – Gráfico da temperatura total no interior do mini auditório.....	49
Figura 13 - Gráfico da circulação do ar .....	50
Figura 14 – Gráfico numero de iterações condição de verão .....	51
Figura 15 – Gráfico temperatura condição de verão .....	52
Figura 16 – Gráfico da circulação do ar para condição de verão .....	53
Figura 17 – Gráfico temperatura condição de primavera .....	54
Figura 18 – Gráfico temperatura condição de inverno .....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxa metabólica para diferentes atividades segundo ISO7730(1994) .....	11
Tabela 2 – Valores de $I_{cl}$ para algumas vestimentas .....	25

Tabela 3 – Escala Térmica de Fanger .....	31
Tabela 4 – Tempo de simulação para os modelos.....	42
Tabela 5 – Parametros utilizados no <i>meshing</i> para o mini auditório .....	44
Tabela 6 – Condições de fronteira para o exemplo.....	48
Tabela 7 – Condições de fronteira para condição de verão .....	51
Tabela 8 – Condições de fronteira para condição de primavera .....	53
Tabela 9 – Condições de fronteira para condição de inverno .....	55

## **LISTA DE ABREVIATURAS**



ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Antes de Cristo
ASHRAE	American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASHVE	American Society of Heating and Ventilating Engineers
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLO	Clothing
DC	Depois de Cristo
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
PMV	Predicted Mean Vote – Voto Médio Estimado
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied – Percentagem de pessoas insatisfeitas
ISO	International Organization for Standardization
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
TEC	Temperatura Efetiva Corrigida

### LISTA DE SÍMBOLOS

M	taxa metabólica (W/kg)
TRM	Temperatura radiante média (°C)
$t_{cr}$	temperatura interna do corpo (°C)
$t_{sk,m}$	temperatura média da pele (°C)
$t_{cr,t}$	temperatura interna timpânica (°C)
$t_{cr,r}$	temperatura interna retal (°C)
$t_{cr}$	temperatura interna do corpo (°C)
$V_a$	velocidade do ar ao nível do globo (m/s)
$T_{ar}$	temperatura do ar (°C)
$T_g$	temperatura de globo (°C)

### Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
---------------------------	-----------

<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>16</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
4.1 CONFORTO TÉRMICO.....	17
4.2 VARIÁVEIS DE CONFORTO TÉRMICO .....	21
4.2.1 Temperatura do ar .....	21
4.2.2 Temperatura radiante média.....	21
4.2.3 Umidade do ar.....	22
4.2.4 Velocidade do ar.....	23
4.2.5 Variáveis Humanas.....	23
4.2.6 Variáveis Arquitetônicas .....	26
4.3 NORMAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO .....	28
4.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO .....	30
4.5 EFEITO DO MOVIMENTO DO AR .....	32
4.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	34
<b>5 METODOLOGIA</b> .....	<b>36</b>
5.1 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA.....	37
5.2 DEFINIÇÃO DA MALHA.....	37
5.3 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FRONTEIRA .....	37
5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	38
<b>6 RESULTADOS</b> .....	<b>38</b>
<b>6.1 MODELOS DE TURBULÊNCIA</b> .....	<b>39</b>
6.1.1 Modelos $k - \epsilon$ .....	40
6.1.2 Modelo Standard $k - \epsilon$ .....	40
6.1.3 Modelo RNG $k - \epsilon$ .....	41
6.1.4 Modelo Realizable $k - \epsilon$ .....	42
<b>6.3 MODELAGEM</b> .....	<b>43</b>
<b>6.4 CONDIÇÃO DE VERÃO</b> .....	<b>50</b>
<b>6.5 CONDIÇÃO DE PRIMAVERA</b> .....	<b>53</b>
<b>6.5 CONDIÇÃO DE INVERNO</b> .....	<b>54</b>
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O conforto térmico e as relações entre o ambiente e os seres humanos é objeto de estudo desde os primórdios da existência humana, onde o homem procurava se proteger do sol e da chuva em cavernas ou em abrigos, buscando um melhor bem-estar para si e assim o seu conforto. O homem possui melhores condições de vida e de saúde quando submetido a ambientes onde seu corpo funciona de maneira praticamente isenta de fadiga ou estresse, inclusive térmico. Sendo assim, o ambiente, qualquer que seja, deve oferecer condições térmicas favoráveis ao conforto térmico humano, principalmente o interior de construções, como edifícios, residências, entre outros, independente de quais forem às condições climáticas externas (FROTA e SCHIFFER, 2001).

As principais variáveis climáticas de conforto térmico são temperatura, umidade, velocidade do ar e radiação solar incidente, as quais variam de acordo com a região estudada. Bem como alguns fatores como regime de chuvas, vegetação, permeabilidade do solo, águas superficiais e subterrâneas, entre outras características locais que podem ser alteradas de acordo com a intervenção humana. Outros parâmetros são importantes para avaliação do conforto térmico, além das variáveis citadas anteriormente, as atividades desenvolvidas pelo indivíduo e suas vestimentas devem ser levados em conta (FROTA e SCHIFFER, 2001).

O conceito de conforto térmico para um humano está relacionado com o funcionamento de seu organismo, o qual consiste em um mecanismo complexo, que procura manter a temperatura do corpo entre 36 e 37°C. Para isso o homem está em troca constante de calor com o ambiente de diversas maneiras. Quando estas trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente ocorrem sem um considerável esforço, a sensação do indivíduo é de conforto térmico. Assim, se condições ambientais causarem a sensação de frio ou de calor, significa que o organismo está perdendo mais ou menos calor que o necessário para a manutenção da temperatura corporal, a qual passa a ser dificultada, adicionando-se um esforço, podendo ser representado com queda no rendimento nas atividades praticadas, sensação de cansaço, e até mesmo problemas de saúde (FROTA e SCHIFFER, 2001).

Esses mecanismos para troca de calor com o ambiente, variam de acordo com a sensação do ser humano de calor ou frio. Em consequência da sensação térmica de calor, pode ocorrer a vasodilatação, aumento do volume de sangue acelerando o ritmo cardíaco, provocando assim a transpiração, que consiste na liberação da água corporal através da evaporação provocada devido ao aumento da temperatura corporal decorrente do maior fluxo sanguíneo. Já em reação ao frio, ocorre a vasoconstrição, diminuição do volume de sangue e do ritmo cardíaco. Nesse caso, o organismo provoca arrepios e o tiritar, “tremor de frio”, a fim de gerar calor (LAMBERTS, 2000). A quantidade de calor liberado pelo organismo depende da atividade desenvolvida, onde o calor produzido em seu interior é dissipado para o meio ambiente por condução, convecção, radiação (trocas secas) e por evaporação (trocas úmidas), através da transpiração. (FROTA e SCHIFFER, 2001).

A Tabela 1 apresenta dados relativos ao calor dissipado pelo corpo em função da atividade desenvolvida pelo indivíduo. Onde valores de metabolismo são já determinados pela Norma ISO 7730 (2005) para diversas atividades, para assim obter valores médios de taxa metabólica de acordo com a área de superfície corporal do indivíduo obtida através de sua altura e massa.

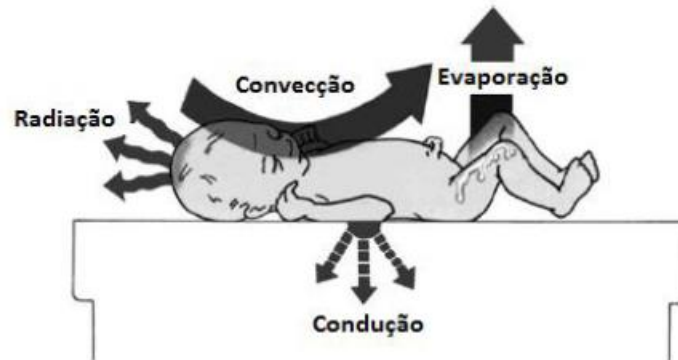
**Tabela 1 – Taxa metabólica para diferentes atividades segundo ISO7730(2005)**

<b>Atividade</b>	<b>Metabolismo (W/m<sup>2</sup>)</b>
Reclinado	46
Sentado, relaxado	58
Atividade sedentária (escritório, escola, etc.)	70
Fazer compras, atividades laboratoriais	93
Trabalhos domésticos	116
Caminhando em local plano a 2Km\h	110
Caminhando em local plano a 3Km\h	140
Caminhando em local plano a 4Km\h	165
Caminhando em local plano a 5Km\h	200

**Fonte: LAMBERTS et al (2000)**

Para que o homem permaneça em sensação de conforto térmico, equilíbrio térmico com o ambiente, seu organismo realiza diversos processos de trocas térmicas. Essas trocas térmicas quando realizadas sem a presença de água são qualificadas como “trocas secas”, as quais se referem às trocas por condução, convecção e radiação. Já quando essas trocas são realizadas com a presença de água são qualificadas como “trocas úmidas”, como a evaporação,

a Figura 1 mostra esquematicamente as trocas de calor realizadas pelo corpo humano, buscando o conforto térmico.



**Figura 1– Mecanismos de perda de calor para o ambiente**  
**Fonte: Çinar e Filiz (2006)**

Um dos casos de troca de calor por convecção ocorre quando a temperatura do ar é inferior à do corpo, sendo assim, o corpo perde calor para o ar ao entrar em contato com o mesmo, a troca de calor através do contato tem sua importância, por se tratar de uma troca intensa de calor. Por exemplo, o contato com um piso aquecido num dia frio, parece, segundo Schmid (2005), restabelecer o equilíbrio térmico do corpo, assim como caminhar descalço sobre um piso de pedra faz perder calor, a qual se torna a sensação ideal para um dia quente.

Já a troca de calor por radiação se dá pela transferência de energia na forma de ondas eletromagnéticas através do espaço, essas ondas são absorvidas pela matéria e se convertem em calor. É possível dizer que praticamente toda superfície emite radiação, e esta não depende do ar nem de qualquer outro meio para se propagar, ou seja, “Uma pessoa num ambiente está continuamente emitindo e recebendo energia radiante, e o diferencial entre a energia recebida e a emitida é que define se o corpo é aquecido ou resfriado por radiação”. Portanto, é importante entender este processo de troca de calor, uma vez que, se a parede de um ambiente possuir uma temperatura menor que a do corpo, este perderá calor por radiação, caso contrário, se a parede possuir temperatura superior à do corpo, este receberá calor por radiação (RUAS, 1999).

Sendo assim, é possível perceber que estabelecer o conforto térmico para um ambiente é algo complexo e que determina um estudo aprofundado dos diversos parâmetros apresentados anteriormente, pois para cada pessoa a

sensação de conforto térmico é bastante variável, o que para um indivíduo gera uma sensação de frio, não necessariamente pode gerar a mesma sensação para outro, tendo assim diversas condições de conforto para um mesmo ambiente, logo foram criados alguns índices de avaliação de conforto térmico, como por exemplo, o PMV (Predicted Mean Vote – voto previsto médio) e o PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied – porcentagem previsível de insatisfeitos).

Tais índices de avaliação de conforto térmico serão citados e explicados no decorrer deste trabalho, bem como suas normas, com o intuito de embasamento para realização da pesquisa e comprovação dos resultados obtidos através da simulação computacional aplicada neste estudo de caso.

Para a simulação do conforto térmico em um ambiente de auditório, que será estudado no decorrer deste trabalho, será utilizado o *software* ANSYS, que é um *software* de simulação utilizado em diversas classes de problemas de engenharia. Este *software* basicamente realiza uma análise através de uma malha pré-definida, obtendo um resultado satisfatório em decorrência do número de pontos estudados e precisão dos dados obtidos.

Neste trabalho este método será aplicado no mini auditório da UTFPR, campus Guarapuava, com parâmetros de entrada estabelecidos e determinação das variáveis que influenciam no conforto térmico, com o intuito de estabelecer quais serão as condições ideais de temperatura no interior do mini auditório para favorecer um melhor rendimento das pessoas em seu interior, de acordo com as condições climáticas externas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar com o auxílio de um software a simulação das condições de desempenho de conforto térmico no mini auditório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Guarapuava, na cidade de Guarapuava, Paraná.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisão bibliográfica sobre o tema conforto térmico;
- Estabelecer os parâmetros necessários para realizar a simulação de acordo com os dados climáticos da cidade;
- Avaliar a influência dos parâmetros estudados na sensação de conforto térmico;
- Realizar a simulação computacional utilizando o *software* ANSYS;
- Comparar os dados obtidos computacionalmente com os dados teóricos;
- Convergência e validação de dados obtidos no ANSYS (Fluent).

### 3 JUSTIFICATIVA

O conforto térmico é um aspecto importante no desempenho das atividades desenvolvidas por uma pessoa, por isso os estudos voltados para este tema vêm sendo cada vez mais explorados, já que com as constantes mudanças ambientais os gradientes de temperatura vêm crescendo significativamente no planeta, elevando a necessidade de um ambiente bem projetado para o conforto térmico, para que assim em um determinado ambiente cada pessoa esteja em seu conforto térmico obtendo assim o seu melhor rendimento em uma determinada atividade (Xavier, 2000).

Em um ambiente universitário é de extrema importância que cada indivíduo se sinta confortável, para que as atividades sejam desenvolvidas de maneira adequada. O auditório da UTFPR o qual será objeto de estudo, será avaliado se o projeto está de acordo com os estudos de conforto térmico, uma vez que este ambiente possui refrigeração através de ar condicionado, com janelas e paredes vedadas para não vazamento de som para seu exterior, sendo tais características levadas em consideração para este estudo.

Tal local foi escolhido devido ao número considerável de pessoas comportadas por esta sala, e com a simulação do conforto térmico, poderão ser avaliados alguns dos parâmetros necessários para o conforto de seus ocupantes, tais parâmetros serão estabelecidos previamente para um estudo significativo, assim sendo possível determinar se o mini auditório está de acordo com índices já determinados de conforto térmico, ou seja, se a energia gasta por um indivíduo para manter sua temperatura corporal está sendo minimizada fazendo com que o mesmo se sinta confortável dentro desta sala.

Com a utilização do *software* ANSYS, será possível realizar um estudo de maneira rápida e eficiente sobre o conforto térmico, já que é necessária a análise de diversos parâmetros. Um estudo prático se torna bastante demorado e caro, pois os equipamentos necessários para tal estudo são específicos e difícil de serem encontrados, já que o clima está em constante mudança e tais mudanças devem ser levadas em conta para a obtenção de um resultado satisfatório para o estudo.



## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica é abordado de forma geral o conceito sobre conforto térmico, suas variáveis climáticas, humanas e arquitetônicas as principais normas de avaliação de desempenho, métodos de avaliação de conforto térmico e o efeito do movimento do ar para o conforto térmico. Em seguida, são citados os princípios para melhoria de desempenho térmico e discutidas as formas de obtenção de dados necessários para avaliação de desempenho térmico de uma edificação através de simulação computacional.

### 4.1 CONFORTO TÉRMICO

Nas últimas décadas tem se tornado mais intenso os estudos a respeito do conforto térmico em ambientes internos, contudo esta busca pela sensação de conforto buscando o bem estar físico, fisiológico e psicológico do ser humano vem de longa data. Desde os primórdios o homem vem se adequando aos obstáculos que lhe são apresentados referentes ao clima e seu conforto térmico (Xavier, 2000).

Segundo Auliciems e Szokolay (1997), Sócrates já no século IV AC, tinha algumas ideias a respeito da adequação climática de residências e de como construir a fim de obter a melhor condição de conforto térmico. Ainda conforme os autores, Vitruvius, no século I DC, também escreveu sobre a necessidade de se considerar o clima nos projetos de edificações, por razões de saúde e de conforto.

Até a época da Revolução Industrial, não era dada a devida atenção aos estudos sobre conforto térmico. Com o avanço na industrialização ocorrida no início do século XX, começou a surgir a visão de que melhores condições de trabalho eram importantes, tendo em vista principalmente manutenção da saúde do trabalhador e de sua produtividade. Houghten e Yagloglou (apud XAVIER, 2000) buscaram então delimitar uma “zona de conforto”, efetuando estudos nos laboratórios da ASHVE (American Society of Heating and Ventilating Engineers). Já na Inglaterra, a preocupação se deu com relação ao estabelecimento dos limites das condições ambientais para o trabalho, onde Vernon e Warner (1932) e mais tarde Bedford (apud XAVIER, 2000) efetuaram estudos empíricos envolvendo trabalhadores de fábricas.

No final da década de 60, em um estudo desenvolvido em câmaras climatizadas na Dinamarca, Fanger (1970), correlacionou a sensação térmica das pessoas com o balanço térmico verificado entre o corpo humano e o meio ambiente ao redor. Ao final deste estudo, Fanger, enunciou sua clássica teoria conhecida como modelo PMV (Predicted Mean Vote – voto previsto médio), onde a sensação térmica ou PMV é baseado em função do balanço térmico ocorrido. Tal estudo deu origem à Norma ISO 7730 / 2005, que é a norma internacional que define o modelo de conforto térmico para edifícios.

Segundo Nicol (1993), a interação térmica entre pessoa e ambiente é altamente complexa, e tem sido objeto de inúmeros estudos. Desde os processos internos pelos quais as pessoas produzem e respondem ao calor até os processos de transferência de calor entre o homem e o ambiente.

Dessa forma é notável o avanço no número de estudos que buscam um levantamento dos dados necessários para se determinar a forma como se conseguir o conforto térmico, contudo ainda existem diversos obstáculos, e tais estudos ainda mostram resultados diferentes de modelos já propostos, como argumenta Xavier (2000):

Atualmente, vários estudos de campo têm sido realizados em diversas regiões do planeta (Xavier, 2000; Araújo, 1996; Baker e Standven, 1995; Nicol et al, 1994; Humphreys, 1976.), além de vários outros. Os resultados desses estudos diferem daqueles encontrados por Fanger (1970), principalmente por terem sido realizados em realidades totalmente distintas das encontradas em uma câmara climatizada. Essa distinção geográfica acentuando-se no caso brasileiro, onde segundo Ruas (1999), o Brasil possui uma grande extensão territorial e por isso apresenta diferentes regimes de chuvas e temperaturas. De norte a sul encontra-se uma grande variabilidade de climas, com distintas características regionais.

Assim o conforto térmico pode ser analisado sob dois aspectos distintos:

(a) do ponto de vista pessoal; (b) do ponto de vista ambiental.

Para Xavier (2000), "o aspecto pessoal é aquele onde uma determinada pessoa que se encontre em um determinado ambiente esteja em estado confortável com relação a sua sensação térmica", ou seja, este aspecto pode variar de acordo com as características individuais de cada pessoa, onde o que pode estar confortável para uma não necessariamente estará confortável para outra.

Fanger (1970), através de seus estudos realizados em câmaras climatizadas define conforto térmico como sendo: “uma condição de mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”. Com a posterior normalização dos estudos de conforto térmico, através da ASHRAE 55 (1992), e ISO 7730 (2005), essa se tornou a clássica definição de conforto térmico. Rohles (1980), através de uma análise mais crítica adverte que na maioria dos estudos de conforto térmico é analisado de maneira conjunta a temperatura do corpo (condição do corpo) e as sensações relatadas pelas pessoas (condição da mente). Através dessa análise, o autor tenta demonstrar que os estudos convencionais levam em conta bem mais a condição do corpo de uma pessoa do que apenas a condição da mente, contradizendo dessa forma a definição de conforto térmico proposta por Fanger.

Ainda em relação à fisiologia ou psicologia, Gagge (1979) refere-se que o equilíbrio fisiológico de conforto térmico é composto por dois sinais que invocam a sensação térmica, os sinais ligados à temperatura da pele e os sinais ligados às atividades termorreguladoras do organismo, onde o primeiro está associado à temperatura da pele e o segundo associado à temperatura do corpo. De acordo com Fiala (1998), há uma diferença entre a percepção do conforto térmico e a percepção da temperatura. Por conveniência é geralmente atribuído para o conforto, o estado térmico geral e regulador do organismo, em contrapartida para a percepção de temperatura ou sensação de temperatura depende principalmente sensores da pele ou termo receptores cutâneos.

Já o aspecto ambiental é aquele em que a combinação das variáveis físicas que compõem esse ambiente tende a criar condições termo ambientais para que o número de pessoas insatisfeitas com esse ambiente seja o menor número possível. Como os estudos de conforto térmico geralmente envolvem aspectos pessoais e ambientais, é extremamente difícil que um grupo de pessoas que estejam sujeitas a um mesmo ambiente, ao mesmo tempo, estejam todas elas satisfeitas com as condições térmicas do mesmo (Xavier, 2000). Portanto, é possível dizer que um ambiente é termicamente aceitável quando esse ambiente apresenta combinações de variáveis físicas que o tornem desconfortável para menor número de pessoas possíveis (ISO 7730, 2005).

A ambiguidade existente na definição clássica de conforto térmico,

tratando do conforto a partir da condição da mente e da condição do corpo, fez surgir a definição de Neutralidade Térmica, referindo-se a condição física do balanço térmico, o que segundo Fanger (1970) pode ser definida como: “a situação onde uma pessoa não prefira nem mais calor nem mais frio no ambiente ao seu redor”. A grande maioria dos estudos sobre conforto térmico, principalmente aqueles encontrados em ambientes moderados, possuem as duas definições anteriores, de conforto térmico e neutralidade térmica, com um sentido de sinônimas, de modo que para alcançar o conforto térmico é preciso procurar pela neutralidade térmica.

Porém ao analisar com maior atenção, ambas as definições, nota-se que elas possuem realmente certa diferença, ficando um pouco mais evidente a distinção entre os aspectos físicos e fisiológicos da conceituação. Isso significa que uma pessoa possa não querer nem um ambiente mais quente nem mais frio, e assim mesmo não estar em conforto térmico, com base em sua condição mental.

Neutralidade térmica é o balanço térmico entre o homem e o ambiente. De acordo com o próprio autor, embora a mesma seja necessária para verificar-se o conforto térmico, nem sempre é suficiente para a sua existência. Tanabe (1988) tentou diminuir a confusão gerada entre a semelhança das definições sugerindo que o conceito de neutralidade térmica pudesse ser definido como sendo: “o estado da mente que expressa satisfação com a temperatura do corpo como um todo”.

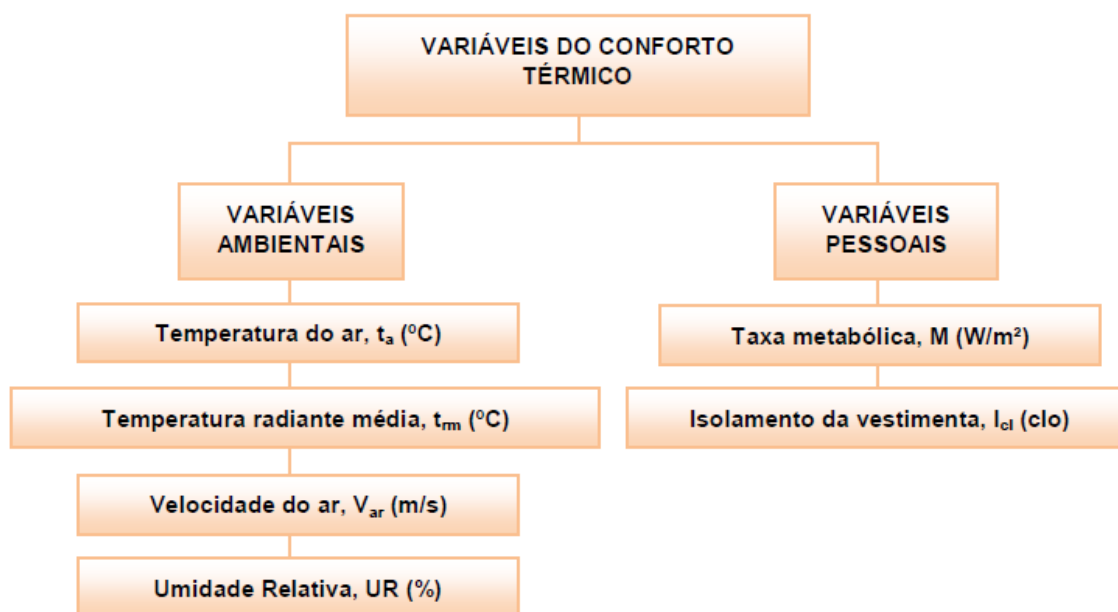
É possível verificar a importância do estudo a respeito do conforto térmico, já que o ser humano se trata de um ser racional, e parece óbvio que o mesmo busque de todas as formas possíveis atingir seu bem estar e conforto em todos os aspectos, sejam eles, físicos, fisiológicos, emocionais ou sociais.

A partir da característica racional humana, Fanger (1970), afirmou que a principal razão para a criação de condições de conforto térmico está relacionada ao “desejo do homem de sentir-se termicamente confortável”, ou seja, a satisfação humana. Os estudos de Fanger foram realizados a partir do balanço térmico entre o homem e o ambiente no qual o mesmo está presente, e sua satisfação com este ambiente é identificada quando as combinações das variáveis ambientais se contrabalançam com a produção interna de calor pelo organismo, isto é, quando não é necessária a ativação dos mecanismos de

termorregulação humana, ou seja, não é necessário um gasto de energia maior pelo organismo para manter a temperatura interna do corpo constante.

## 4.2 VARIÁVEIS DE CONFORTO TÉRMICO

São inúmeras as variáveis que influenciam no conforto térmico de um indivíduo, dentre as principais variáveis ambientais que podem ser medidas diretamente, pode-se citar, a temperatura do ar ( $T_{ar}$  - °C), a temperatura radiante média ( $T_{rm}$  - °C), umidade relativa do ar (UR - %) e a velocidade do ar ( $V_{ar}$  - m/s). Além destas variáveis, as atividades físicas exercidas pelo homem bem como sua vestimenta também interagem diretamente com a sensação de conforto térmico do mesmo. A Figura 2 exemplifica um esquema com algumas das variáveis que influenciam no conforto térmico.



**Figura 2 – Variáveis do Conforto Térmico.**  
**Fonte: BRODAY (2013)**

### 4.2.1 Temperatura do ar

É a temperatura do ar em torno do corpo humano, a qual tem importante relevância nos estudos de conforto térmico para a determinação da troca de calor por convecção entre as pessoas e o ambiente ao redor das mesmas. Essa variável pode ser medida por sensores líquidos ou sólidos de expansão, termômetros elétricos, de resistência variável ou termopares. (XAVIER, 2000).

### 4.2.2 Temperatura radiante média

É a temperatura uniforme de um ambiente particular, em que a transferência de calor radiante do corpo humano é igual à transferência de calor radiante no ambiente. A temperatura radiante média pode ser medida utilizando um termômetro de globo, um radiômetro de duas esferas, entre outros. Sendo o termômetro de globo o mais usual para determinar o valor desta variável, nesse caso a temperatura radiante média é obtida através de observações dos valores simultâneos da temperatura de globo,  $T_g$ , e também da velocidade e temperatura do ar ao redor do globo (XAVIER, 2000). Para um diâmetro de globo padrão de 0,15 m de diâmetro, a temperatura média radiante pode ser calculada através de uma destas duas equações abaixo:

- Convecção natural:

$$TRM = \sqrt[4]{(t_g + 273)^4 + 0,4 \cdot 10^8 \cdot \sqrt[4]{|t_g - t_{ar}|} \cdot (t_g - t_{ar})} - 273 \quad (1)$$

- Convecção forçada:

$$TRM = \sqrt[4]{(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot V_{ar}^{0,6} \cdot (t_g - t_{ar})} - 273 \quad (2)$$

Onde:

TRM = Temperatura radiante média, em °C;

$V_a$  = velocidade do ar ao nível do globo, em m/s;

$t_{ar}$  = Temperatura do ar, em °C;

$t_g$  = Temperatura de globo, em °C.

#### 4.2.3 Umidade do ar

A pressão de vapor é o fator climático mais estável ao longo do dia. Resultado da evaporação da água contida nos mares, rios, lagoas, espelhos d'água em geral, como também da evapotranspiração das plantas (LAMBERTS, 2014).

Quanto mais elevada for a temperatura do ar, menor será a sua densidade e, portanto, pode conter maior quantidade de água, de modo que em locais onde a umidade é elevada a transmissão de radiação solar é menor visto que parte da absorção desta radiação se dá pelo vapor d'água presente no ar (LAMBERTS, 2014).

O ar, a uma dada temperatura, contém certa quantidade de vapor de água, e quando este valor chega a um valor máximo é possível classificar o ar como saturado. A umidade aceitável é determinada pela possibilidade de ocorrência de mofo e outros problemas que podem ser ocasionados pela umidade excessiva (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2005).

#### 4.2.4 Velocidade do ar

O movimento do ar ou vento se dá em função da diferença de temperatura existente entre as massas de ar. Esta diferença de temperatura implica em um deslocamento da área de maior pressão, onde o ar é mais frio e mais pesado, para área de menor pressão, onde o ar é quente e leve (LAMBERTS, 2014).

A velocidade e direção do vento podem ser alteradas com a presença de vegetação, edificações e outros obstáculos naturais ou artificiais, os quais podem desviar, canalizar ou até mesmo alterar esse movimento. O movimento do ar sofre grande influência também a partir da rugosidade da superfície, ou seja, devido ao número de obstáculos encontrados nas cidades, a velocidade média do vento é mais baixa do que quando comparadas com locais abertos (LAMBERTS, 2014).

O ar, uma vez em movimento, ele tende a continuar nesta mesma direção até encontrar um obstáculo que o force a mudar de direção, como cita a propriedade da inércia, ele quando muda de direção e velocidade perde energia cinética. Os dados a respeito do vento são obtidos em estações meteorológicas localizadas em espaços abertos, sem influência de edificações vizinhas, onde se obtém informações sobre a direção, velocidade, frequência e períodos de calmarias do vento. Em geral, estas medições são feitas em uma altura padrão de 10 m acima do solo (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2005).

#### 4.2.5 Variáveis Humanas

O ser humano é biologicamente parecido em qualquer lugar do mundo, sendo capaz de adaptar-se a diferentes condições climáticas utilizando mecanismos culturais como vestimenta, arquitetura e tecnologia (LAMBERTS, 1997). O conforto desejado por todo ser humano pode variar de forma significativa dependendo da sua cultura, bem como de sua idade, suas

vestimentas, seu sexo e da saúde destas pessoas. Um projeto deve se atentar tanto a condições ambientais quanto aos requisitos de conforto de seus usuários (SNYDER; CATANESE, 1984).

Existem diversos estudos que apontam as diversas maneiras de avaliar e expressar o conforto térmico, índices, escalas e tabelas, cartas bioclimáticas, gráficos psicrométricos ou monogramas de temperatura efetiva, como também análises estatísticas. Para avaliação do conforto térmico existem dois fatores que possuem extrema importância: os diversos tipos de roupas e as taxas de metabolismo humano que variam de acordo com a atividade exercida. É importante ressaltar que para tal avaliação as vestimentas devem ser adequadas ao clima e às atividades desempenhadas pelo indivíduo.

Assim, analisando apenas estas duas variáveis para influência no equilíbrio térmico entre o homem e o meio, podemos defini-las, de acordo com Norma americana ASHRAE Standard 55 (1992), e segundo Xavier (2000):

A taxa metabólica é a taxa de produção de energia do corpo. O metabolismo, que varia de acordo com a atividade desempenhada é expresso em unidade "met". 1 met, que corresponde a 58,2 W/m<sup>2</sup>, é igual a energia produzida por unidade de área superficial do corpo para uma pessoa sentada em repouso. A área superficial aproximada de uma pessoa média é de 1,8 m<sup>2</sup>. Os valores dessa variável podem ser extraídas da tabela A.1 da ISO 7730 (1994). Além dessa tabela, a taxa metabólica também pode ser determinada pelas tabelas constantes na ASHRAE (1997), ou através do consumo de oxigênio e da taxa de batimento cardíaco, conforme ISO 8996 (1990)

Contudo estes valores de taxas metabólicas obtidos através destas tabelas podem levar a grandes erros de precisão, já que estas tabelas possuem valores estimados, levando em conta apenas o tipo de atividade desempenhada e não consideram o sexo da pessoa que está desempenhando tal atividade, tipo físico, altura, ou qual esforço que está desenvolvendo para realizar a atividade, entre outros aspectos que levariam um maior batimento cardíaco e conseqüentemente a realização de um esforço maior, tendo assim uma maior taxa metabólica.

Uma maneira mais correta para se determinar a taxa metabólica é através de medições, tanto direta como calorimetria, ou indiretas através do



consumo de oxigênio.

Em estudo de Hayward (apud XAVIER, 2000), sob condições laboratoriais controladas, foram monitoradas oito pessoas, que após um período de preparação foram colocadas em tanques de água fria, visando causar uma diminuição tanto na temperatura interna do corpo como da temperatura da pele, e após 45 minutos estas pessoas foram expostas a um banho quente. Ao longo de todo o experimento as temperaturas médias da pele e as temperaturas internas do corpo (temperatura timpânica e retal) foram medidas, assim sendo determinada a taxa metabólica através de medição indireta, pelo consumo de oxigênio. Os autores correlacionaram a taxa metabólica com as temperaturas interna do corpo e temperatura da pele obtendo as equações (3) e (4) abaixo:

$$M = 0,0356 \cdot (t_{sk,m} - 41,8) \cdot (t_{cr,t} - 41,03) \quad (3)$$

$$M = 0,0314 \cdot (t_{sk,m} - 42,23) \cdot (t_{cr,r} - 41,38) \quad (4)$$

onde:

M = taxa metabólica (W/kg);

$t_{sk,m}$  = temperatura média da pele (°C);

$t_{cr,t}$  = temperatura interna timpânica (°C);

$t_{cr,r}$  = temperatura interna retal (°C).

Outro estudo realizado por Frank et al. (1999), teve como finalidade determinar os dados relativos à contribuição da temperatura média da pele e da temperatura interna do corpo a partir da taxa metabólica, representado pelo consumo de oxigênio (ml/min), relacionando também a sensação subjetiva de conforto térmico, onde neste estudo foi representada pelos votos das pessoas em uma escala de 11 pontos. Os resultados dessa pesquisa mostraram que a temperatura interna para ajudar a taxa metabólica é cerca de três vezes a contribuição média de temperatura da pele, enquanto que o conforto térmico para a contribuição de ambas é semelhante. A equação de correlação obtida para este estudo foi:

$$M = 5849 - 112,3 \cdot t_{cr} - 41 \cdot t_{sk,m} \quad (5)$$

onde:

M = taxa metabólica, através do consumo de oxigênio (ml/min);

$t_{sk,m}$  = temperatura média da pele (°C);

$t_{cr}$  = temperatura interna do corpo (°C);

O isolamento térmico da vestimenta, é o responsável pela resistência oferecida às trocas de calor entre o corpo e o ambiente, através de seu isolamento térmico (XAVIER, 2000). A representação mais comum dessa variável é “ $I_d$ ”, expresso em  $m^2 \cdot K/W$  ou em “clo”, sendo que 1 clo corresponde a 0,155  $m^2 \cdot K/W$ . Os valores de isolamento térmico das roupas dependem do material de confecção dos mesmos, bem como a espessura dos tecidos e materiais das roupas. A determinação desses valores foi feita utilizando-se manequins aquecidos, de acordo com Fanger (1970), a Tabela 2 apresenta alguns índices de resistência térmica ( $I_{cl}$ ) para algumas peças de roupas, sendo que esses resultados dessas determinações encontram-se devidamente tabelados nas normas e manuais ISO 7730 (2005), ISO 9920 (2007) e ASHRAE (1997).

**Tabela 2 – Valores de  $I_{cl}$  para algumas vestimentas.**

Vestimenta	$I_{cl}$	Vestimenta	$I_{cl}$
Meia calça	0,10	Colete em tecido leve	0,15
Meia fina	0,03	Colete em tecido pesado	0,29
Meia grossa	0,05	Sueter em tecido pesado	0,37
Calcinha e sutiã	0,03	Saia grossa	0,25
Cueca	0,03	Vestido leve	0,15
Cuecão longo	0,10	Vestido grosso manga comprida	0,40
Short	0,11	Jaqueta tecido leve	0,22
Bermuda	0,15	Jaqueta tecido pesado	0,49
Camiseta de baixo	0,09	Calça fina	0,20
Camisa de baixo mangas compridas	0,12	Calça média	0,25
Camisa manga curta	0,15	Calça flanela	0,28
Camisa fina manga comprida	0,20	Sandálias	0,02
Camisa manga comprida	0,25	Sapatos	0,04
Camisa flanela manga comprida	0,30	Botas	0,08
Blusa com mangas compridas	0,15		

Fonte: LAMBERTS *et al* (2003).

#### 4.2.6 Variáveis Arquitetônicas

Existem diversas variáveis arquitetônicas as quais devem ser analisadas para elaboração de um projeto, para que o mesmo se adeque de maneira

satisfatória ao conforto térmico. Para este estudo será citado somente a forma e função de um edifício, seja ele destinado a qualquer função, tanto residencial, comercial, industrial, estudantil, lazer, ou qualquer outra. Estas variáveis possuem suma importância no desenvolvimento de um projeto para o alcance do conforto térmico.

Com isso é imprescindível a adequação da forma arquitetônica à sua função, e vice-versa, segundo Lamberts (1997), para a busca do conforto “é necessário o estudo de variáveis arquitetônicas como forma, função, tipos de fechamento e os sistemas de condicionamento (climatização e iluminação). Essas variáveis interagem simultaneamente com o meio ambiente e o homem”. Sendo assim buscar uma perfeita interação entre o homem e o meio em todas as escalas, sejam elas, urbanas, arquitetônicas, construtivas, é o caminho para atingir o conforto térmico nas edificações.

A forma arquitetônica de um projeto é de grande importância no que diz respeito ao conforto térmico, pois a mesma pode favorecer ou não a ventilação natural de um ambiente, como também controlar ou não incidência de luz e de calor solar em um edifício.

Segundo Toledo (2003) baseado em suas pesquisas, “a forma e as proporções do edifício, a orientação das fachadas e o sombreamento das aberturas influenciam diretamente no desempenho térmico do mesmo” e conseqüentemente no consumo de energia elétrica deste edifício.

Pelo local de estudo de se tratar de um clima temperado algumas considerações devem ser analisadas, como por exemplo, o grau de umidade relativa do ar, a variação anual e diária de temperatura e também a quantidade de radiação recebida pelo edifício, principalmente nas duas estações do ano mais importantes, o inverno e o verão, bem como os índices relativos à pluviosidade (FROTA e SCHIFFER, 2001).

Para isso nesta localidade tanto o frio quanto o calor apresentam certo rigor, sendo necessária à busca de alternativas que permitam de alguma forma uma ventilação cruzada e intensa, como também a possibilidade de fechamento hermético das aberturas para impedir a entrada de ventos frios (FROTA e SCHIFFER, 2001).

Já para a função de um edifício, alguns arquitetos consideram que função é consequência da forma, enquanto outros consideram que a forma

segue a função. No entanto é correto afirmar que ambas possuem a mesma prioridade para um determinado projeto. Embora a função a qual seja determinado um edifício possa estar ligada a uma forma já pré-determinada, o mesmo pode sofrer alterações após sua conclusão, ocupação e apropriação espacial. Já que uma arquitetura funcional pode se tornar desconfortável e ineficiente durante o desempenho de algumas tarefas em seu interior (LAMBERTS, 2014).

De acordo Frascari (apud MAHFUZ, 1995) pode-se destacar que “Funções em arquitetura dependem tanto do edifício quanto de quem o usa, ou organiza o seu uso” (p.119). Assim a função arquitetônica relaciona-se com forma e com a eficiência energética de um edifício. Desse modo as funções, residencial, comercial e pública, são diferentes do ponto de vista da dependência do clima e, conseqüentemente, do seu consumo de energia. Cada uma delas tem suas próprias características, que se condicionam a atender exigências específicas com relação ao conforto de acordo com o uso e horários destes edifícios (LAMBERTS et al, 1997).

Portanto, é evidente que o projetista deve harmonizar as diversas variáveis envolvidas ao projetar um edifício, como as climáticas, humanas e arquitetônicas, bem como um baixo consumo energético, no intuito de obter um resultado satisfatório para o conforto e eficiência energética, obtendo assim um ambiente sustentável.

#### 4.3 NORMAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

As principais normas determinam através do cumprimento de diretrizes construtivas ou não, ou por comparação, a avaliação do conforto térmico em um determinado ambiente. A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT possui um projeto de norma (ABNT, 2007) para edificações habitacionais de até 5 andares de altura que apresenta dois procedimentos para avaliação de conforto térmico, um na fase de projeto através de simulação computacional, e o outro para edificações já existentes por meio de medições *in loco*.

A norma brasileira NBR 15220-3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social (ABNT, 2005c) é mais utilizada em avaliações de conforto térmico e baseia-se no método da carta psicométrica. A norma divide o território brasileiro em oito zonas

bioclimáticas e para cada zona é feita a descrição do clima e apresentando recomendações que devem ser aplicadas na fase de projeto visando a otimização do desempenho térmico das habitações por meio de sua adequação ao clima. De acordo com a norma a cidade de Guarapuava esta situada na Zona Bioclimática 1 e assim são estabelecidas as seguintes estratégias:

- Aberturas médias para ventilação com área da abertura entre 15 e 25 % da área de piso dos ambientes;
- Sombreamento das aberturas, permitindo o sol durante o período de frio;
- Utilização de paredes leve e cobertura do tipo leve isolada, o que significa adotar um valor de transmitância térmica de parede menor ou igual a  $3,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e da cobertura, menor ou igual a  $2,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ;

Segundo a norma ASHRAE 90.2-2004 – Energy Efficient Desing of Low-Rise Residential Buildings (ASHRAE, 2004c) criada nos Estados Unidos que prevê os requisitos mínimos de eficiência energética para edificações residenciais de até três andares de altura. Suas recomendações estendem-se para outros países de acordo com a divisão de oito zonas climáticas de território norte-americano estando sujeitas a questionamentos. Leva-se em consideração na norma a taxa metabólica, a resistência da vestimenta, a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a velocidade do ar e a umidade do ar.

Comparando as recomendações entre a norma brasileira e a americana, observa-se que a ASHRAE apresenta valores de transmitância bem menores para o telhado, com  $U = 0,633 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , enquanto que não considera os valores para as paredes, ou seja, a norma americana considera como principal fator para evitar trocas de calor com o ambiente como sendo o isolamento do telhado, e por consequência, evitar o aumento da temperatura interna durante o dia.

A norma ISO 7730 – “Ergonomia de Ambientes Térmicos – Determinação analítica e interpretação do conforto térmico pelo cálculo de índices PMV e PPD e pelos critérios de conforto térmico local”, a qual é aplicada à edifícios que utilizam condicionamento ativo, onde as condições de conforto são estatísticas, utilizando o índice PMV/PPD para estimar a sensação de conforto térmico. Para Nicol (2004) essa norma não descreve de maneira mais adequada as condições

de conforto uma vez que não inclui o princípio adaptativo, negligenciando temperaturas em que as pessoas estariam em conforto. Segundo Moujalled et al (2008) foi comprovado que usuários de edifícios naturalmente ventilados aceitam significativamente uma gama de temperaturas maiores do que as indicadas pela zona de conforto admitida pela norma ISO 7730.

#### 4.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

Atualmente existem diversas formas para avaliação de um ambiente a respeito do conforto térmico, todas baseadas em normas, sejam elas nacionais ou internacionais. Será citado apenas algumas formas dessas avaliações com suas respectivas normas, e em seguida explicado de maneira um pouco mais detalhada a avaliação através do PMV, elaborado por Fanger (1972), um método analítico que emprega o modelo de balanço térmico entre o homem e o ambiente.

Uma destas formas de avaliação proposto por Houghten e Yaglou (1923), determinado na ASHRAE, é o índice denominado Temperatura Efetiva. Neste método foi definido as linhas de igual conforto, que são plotadas em carta psicrométrica, onde inicialmente considerava apenas a temperatura do ar e sua umidade relativa, mas posteriormente, foi levado em conta também o efeito da velocidade do ar e vestimenta do indivíduo.

Posteriormente em 1932, Vernon e Warner, aplicaram uma correção para radiação térmica, usando a temperatura de globo obtendo assim a temperatura radiante média no lugar da temperatura do ar, passando assim a chamar este índice de Temperatura Efetiva Corrigida (TEC).

Após estes estudos foram elaborados ainda outros métodos de avaliação baseados em cartas bioclimáticas, determinando assim zonas de conforto para um ambiente, através da temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar e a radiação térmica. Estes estudos estão constantemente sendo revisados tendo assim algumas alterações nestas cartas bioclimáticas, visando sempre designar uma melhor zona de conforto.

Alguns modelos foram propostos baseados no balanço térmico, o modelo mais usual é o índice PMV/PPD proposto por Fanger (1972), o qual utiliza como referência para a sensação de conforto térmico o resultado de trocas de calor entre o corpo humano e um ambiente termicamente estável, este índice

é empregado na norma internacional ISO 7730 e também na norma ASHRAE Standard 55-2004 (DE DEAR; BRAGER, 2002). A norma ISO 7730 é aplicada à edificações que utilizam condicionamento ativo, onde as condições de conforto são determinados de forma estatística e assim utiliza o PMV/PPD para estimar a sensação de conforto térmico.

O PMV foi criado partindo de uma equação de balanço térmico para o corpo humano, mostrado na equação (6), que corresponde a uma previsão de votação de um determinado número de pessoas relativamente a um dado ambiente térmico. Este índice consiste basicamente em várias pessoas num mesmo espaço com vestimentas e atividades diferentes, tendo assim uma percepção diferente do ambiente térmico ao seu redor. Com uma escala de conforto térmico que varia entre -3 e 3, chamada de escala de 7 pontos, da ASHRAE, apresentada na Tabela 3 representando assim o estado psicológico das pessoas em relação ao ambiente térmico em que se encontram.

$$PMV = 0,303 \cdot e^{(-0,036 \cdot M) + 0,028 \cdot L} \quad (6)$$

onde:

PMV = Voto Médio Estimado (-3 a +3);

M = Taxa Metabólica de Produção de Calor (W/m<sup>2</sup>);

L = Carga Térmica atuando sobre o corpo (W/m<sup>2</sup>).

**Tabela 3 – Escala térmica de Fanger**

Escala	Sensação
+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Levemente quente
0	Neutro
-1	Levemente frio
-2	Frio
-3	Muito frio

**Fonte: LAMBERTS et al (2002)**

Devido às diferenças entre os indivíduos, é impossível conceber um ambiente que seja considerado agradável termicamente por todos, havendo

sempre uma porcentagem de pessoas insatisfeitas. Assim, o PPD, por sua vez, serve para conhecer o número de pessoas insatisfeitas com um determinado ambiente térmico. A equação apresentada por Fanger (1970) para determinação do PPD é dado por:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2} \quad (7)$$

Segundo a Norma ISO 7730 de 2005, recomenda-se que em espaços de ocupação humana termicamente moderados a zona de conforto térmico está localizada entre valores de PMV contidos entre -0.5 e 0.5, concluindo-se que a porcentagem de pessoas insatisfeitas, o PPD, não deve ultrapassar 10%. Através deste modelo, Fanger afirmou que não existe nenhum conjunto de variáveis ambientais e pessoais que satisfaçam a todos os indivíduos em um mesmo ambiente interno, devido as diferenças individuais, o que estiver satisfatório para um, pode não ser satisfatório para outro, mesmo em casos onde o PMV médio corresponde a zero, que significaria uma situação de conforto térmico baseado no modelo, existiriam ao menos 5% de pessoas insatisfeitas com ambiente térmico como mostra a Figura 3.

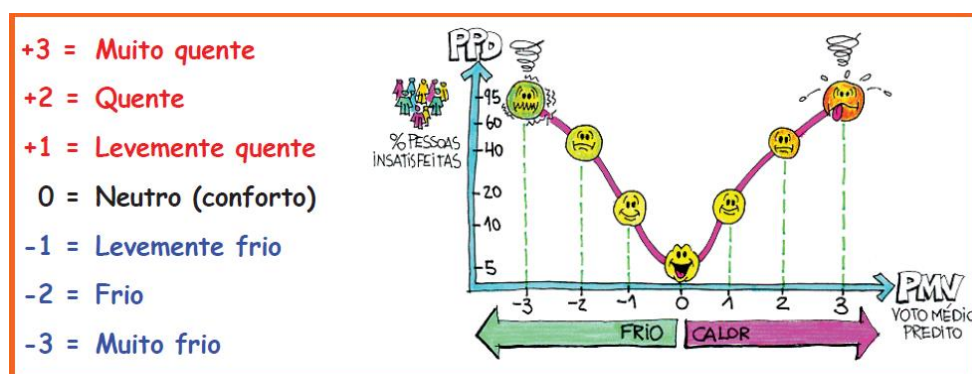


Figura 3 – Gráfico que relaciona PMV e PPD  
Fonte: LAMBERTS (2014)

#### 4.5 EFEITO DO MOVIMENTO DO AR

A ventilação natural é uma das principais estratégias bioclimáticas para proporcionar conforto térmico em um ambiente. Com a ventilação natural é possível proporcionar a remoção de calor interno de um edifício e o aumento da perda de calor dos indivíduos em efeito da movimentação do ar, tem influência direta na sensação de conforto térmico dos mesmos. Contudo, o cálculo envolvido na remoção de calor de um edifício através da ventilação natural tem



inúmeras complexidades (PEDRINI, 2007).

A utilização de programas de simulação térmica exige do usuário uma técnica para declarar rotinas que venham a elaborar a renovação do ar ao invés de apenas calculá-la. Ou seja, as trocas de ar devem obedecer a um determinado período, como por exemplo, uma rotina horária, onde apenas programas de simulação computacional de fluidos, os chamados CFD, tem a capacidade de simular estas renovações, entretanto para períodos curtos, sendo inviável, por exemplo, para simulações de período anual.

Segundo Oliveira (2006) o aumento nas taxas de ventilação diminuem as variações de comportamento térmico, podendo de certa forma levar à interpretação de resultados enganosos para o desempenho de um ambiente, uma vez que um edifício que possui uma forma inadequada quanto às transmitâncias térmicas pode obter um satisfatório desempenho térmico com a incidência de elevadas taxas de ventilação. O autor também cita que a eficiência de um edifício não pode ser garantida apenas pela presença constante de ventilação natural, já que os mesmos possuem uma considerável variação quanto a sua disponibilidade, principalmente em zonas urbanas. Dessa forma, o impacto na escolha da forma de um edifício possui maior importância para o caso de pouca ventilação, já que diante de tal cenário as características do edifício serão mais importantes no controle do conforto.

Analisando a influência da ventilação para o aumento da perda de calor de um indivíduo é constatado que também apresenta complexidades. Embora o movimento do ar sobre a pele aumentar as transferências de calor, por meio da convecção, aumentando assim a perda de calor do indivíduo para o ambiente, a eficácia destas perdas de calor são proporcionais à velocidade do ar e à diferença de temperatura entre a pele e o ar, assim como também à umidade presente no ar (LAMBERTS et al, 2003).

Dessa forma quando a temperatura do ar é maior que a temperatura do corpo humano este movimento do ar torna-se desfavorável à sensação de conforto térmico, por aumentar a sensação de desconforto imposta ao indivíduo. Assim quando a velocidade do ar não é apropriada para a atividade desenvolvida em um ambiente, este ambiente torna-se desconfortável, provocando uma sensação de desconforto para quem as realiza neste ambiente.

Portanto, o impacto do movimento do ar no conforto térmico ainda é uma

área sem uma definição determinada para considerar seu efeito nos limites de desconforto ao calor (SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006). O limite máximo de 1 m/s é geralmente adotado para não levantar papéis em um ambiente de escritório, por exemplo. Já em condições muito quentes, velocidades de 2 m/s são desejáveis e velocidades de 5 m/s são quase sempre consideradas desconfortáveis para qualquer tipo de atividade que venha a ser desenvolvida. De acordo com vários modelos de conforto é possível compensar o aumento de temperatura do ar através do movimento do ar, ou seja, mesmo em temperaturas altas, quando acompanhadas de maiores velocidades do ar é possível atingir o conforto térmico (NICO; HUMPHREYS, 2002).

#### 4.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Atualmente são bem comuns os estudos voltados para o conforto térmico, já que, visando um ambiente favorável é necessário que existam condições mínimas de conforto, principalmente em locais acadêmicos, onde facilita as atividades desenvolvidas pelos alunos neste ambiente, aumentando assim sua produtividade. É necessário a realização de um estudo detalhado nestes ambientes permitindo a otimização das variáveis climáticas que interferem na sensação de conforto térmico. Para a realização destes estudos e buscando resultados satisfatórios vêm se utilizando a simulação computacional, visando a obtenção destes resultados de maneira mais rápida e eficaz.

Uma das maneiras da obtenção destes resultados é com a utilização de *softwares* CFD (*Computational Fluid Dynamics*), os quais são uma ferramenta poderosa e útil para o estudo destes casos, já que permitem examinar o escoamento de fluidos, transferências de calor e massa, mudança de fase, reações químicas, entre outros, sendo cada vez mais frequente a sua utilização nas análises de estudos de caso para este cenário. Tais *softwares* utilizam modelos matemáticos representativos das leis da física que governam tais fenômenos e são descritos por equações diferenciais de derivadas parciais, muitos das quais não possuem resolução analítica (ALVES, 2010).

Os códigos de CFD são estruturados em torno de algoritmos numéricos que resolvem os problemas com escoamentos de fluidos, proporcionando dessa forma um fácil acesso à ferramenta de solução. Todos os pacotes presentes em um CFD incluem interfaces sofisticadas para introduzir os parâmetros dos

problemas e para avaliar os resultados obtidos. Basicamente os códigos são divididos em três elementos principais: pré-processamento dos dados, solução dos dados e pós-processamento dos dados. O pré-processamento consiste nos dados iniciais do problema, utilizando uma interface de simples utilização e a transformação destes dados numa forma adequada para serem analisados e solucionados (SOUZA, 2011).

A precisão da solução de um CFD leva em conta o número de elementos e de nós da malha, em geral, quanto mais fina for a malha, ou seja, possuir um maior número de elementos, maior será a precisão da solução. Tanto a precisão quanto o tempo levado pelo *software* para realização dos cálculos da solução dependem do tamanho da malha, portanto quanto mais fina uma malha, maior sua precisão na solução, contudo maior será o tempo para esta solução. Devendo assim a determinação de uma malha ser coerente com objeto de estudo, baseado nas variações existentes no local de estudo e quais resultados são esperados deste estudo (SOUZA, 2011).

Para este estudo será utilizado o *software* ANSYS, que possui uma grande capacidade de modelação, capaz de realizar uma boa aproximação de escoamentos, turbulências, transferências de calor e reações para aplicações do estudo de conforto térmico em um determinado ambiente. O ANSYS realiza os cálculos para solução de um determinado problema através de solução numérica utilizando o método de volumes finitos baseado na malha definida. Tais resultados podem ser visualizados na forma de gráficos, tanto 2D quanto 3D, como também de outras formas.

## 5 METODOLOGIA

Como citado anteriormente, se definiu como objeto de estudo o mini auditório de um edifício de um dos blocos que compõem o câmpus da UTFPR, na cidade de Guarapuava, Paraná, considerando-se as suas condições de conforto térmico, de acordo com suas características arquitetônicas, baseado em sua planta, mostrada na Figura 4.



**Figura 4 – Planta mini auditório.**  
**Fonte: UTFPR – Guarapuava, 2018.**

Inicialmente, a pesquisa se deu com apoio do referencial teórico, como ilustrado nos capítulos anteriores, os quais foram abordados os principais

parâmetros para compreensão do tema abordado. Para elaboração deste estudo foi necessária a caracterização do clima da cidade de Guarapuava, considerando as médias anuais de temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica, dados esses obtidos através do INMET.

Com a finalidade de obter um resultado significativo e relevante a partir do estudo de caso, optou-se por selecionar a área na Cidade dos Lagos, em Guarapuava – PR. Tendo em vista de se tratar de uma área acadêmica, e possuir uma grande influência da ventilação natural, sendo sua principal fonte de refrigeração dos ambientes deste câmpus.

O estudo será efetuado através de simulação computacional com a utilização do ANSYS. Como o ensino da utilização deste *software* não consta no programa do curso de graduação em Engenharia Mecânica desta Universidade, a aprendizagem da utilização das ferramentas necessárias se dará de forma autônoma, através de estudos de tutoriais em um exemplo de estudo de caso, e assim sendo possível a utilização desta ferramenta seguindo os passos descritos a seguir.

## 5.1 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA

Primeiramente é necessário definir e efetuar a modelagem da geometria que será estudada, para isso é utilizado o *software DesingModeler* do próprio ANSYS. Este *software* é semelhante a outros softwares utilizados ao longo do curso, como por exemplo, SolidEdge e Inventor tornando assim simples a modelagem da geometria. As dimensões desta geometria, por se tratar de um ambiente estudantil, serão obtidas através das plantas dos blocos que compõem a UTFPR, fornecidas pela direção da Universidade.

## 5.2 DEFINIÇÃO DA MALHA

Depois de efetuada a modelagem da geometria é necessário definir a malha para estudo da mesma. Para definir esta malha é utilizado o *software Meshing* do ANSYS.

## 5.3 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Depois de efetuados os procedimentos anteriores é necessário definir um modelo de escoamento dentre os disponíveis no *software*, para isso é

utilizado o *FLUENT*. Após a definição de um modelo de escoamento a ser utilizado, o qual será descrito ao decorrer do trabalho, é definido as condições de fronteira para a geometria definida, onde para este estudo de caso serão utilizadas as variáveis climáticas citadas anteriormente neste trabalho, buscando assim um resultado satisfatório, bem próximos da realidade.

Com estes dados iniciais definidos, o *software* permite definir o número de iterações que é pretendido se utilizar para realização dos cálculos, com a definição deste número de iterações inicia-se a simulação.

#### 5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o término da simulação é possível analisar os resultados obtidos com os parâmetros definidos anteriormente, com a interpretação dos gráficos mostrados, caso tais resultados não estejam de acordo com o esperado, repete-se o processo, alterando parâmetros, como refinamento de malha buscando melhores resultados.

### 6 RESULTADOS

Segundo Souza (2011), o método dos volumes finitos é um método de aproximação comum em códigos CFD, onde as equações são resolvidas dividindo-se o domínio do problema estudado em um número finito e contínuo de volumes de controle. Pode-se definir de maneira simplificada o MVF como, “um método de solução de equações diferenciais parciais na forma de equações algébricas” (LEVEQUE, 2000). O ANSYS se utiliza dessas equações para efetuar as simulações dos escoamentos, buscando soluções através das equações de Navier-Stokes adaptadas aos escoamentos da simulação, aplicando os princípios de conservação de massa, movimento e energia, demonstrados, respectivamente, nas equações a seguir, (ALVES, 2010):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (9)$$

$$\bar{\tau} = \mu[(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T) - \frac{2}{3}\nabla\vec{v}l] \quad (10)$$

## 6.1 MODELOS DE TURBULÊNCIA

Os escoamentos turbulentos têm como característica a variação nos campos de velocidade. Tais variações causam outras variações nas equações de movimento, energia e concentrações de espécies. Visto que estas podem ser pequenas e possuir alta frequência, de modo que elas acabam sendo muito caras de resolver computacionalmente, tendo em vista que exigem muito da máquina a qual está realizando os cálculos, exigindo um tempo muito alto e também um *hardware* avançado para conclusão dos cálculos. Portanto, modelos foram criados para facilitar tal resolução (SOUZA, 2011).

O *software* ANSYS FLUENT possui diversos modelos de turbulência, onde são eles:

- Modelo *Spalart-Allmaras*
- Modelos  $k - \varepsilon$ 
  - Modelo  $k - \varepsilon$  *Renormalization* (RNG)
  - Modelo  $k - \varepsilon$  *Realizable*
  - Modelo  $k - \varepsilon$  *Standard*
- Modelos  $k - \omega$ 
  - Modelo  $k - \omega$  *Standard*
  - Modelo  $k - \omega$  *Shear-stress transport* (SST)
- Modelo de transição  $k - kl - \omega$
- Modelo de transição SST
- Modelo  $v^2 - f$  (add-on)
- Modelos de tensão de *Reynolds* (RSM)
  - Modelo RSM de pressão linear
  - Modelo RSM de pressão quadrática
  - Modelo RSM de baixo *Reynolds*, *stress-omega*

A escolha do modelo de turbulência irá depender das condições do problema, como por exemplo, o nível de precisão procurado, não sendo assim

capaz de considerar um modelo melhor que o outro. Particularmente para este trabalho a escolha está focada nos modelos  $k - \varepsilon$  o qual será brevemente explicado e demonstrado suas equações nas subseções a seguir.

### 6.1.1 Modelos $k - \varepsilon$

Os modelos de duas equações de transporte separadas são considerados os modelos de turbulência mais simples e completos já que permitem o cálculo independentemente da velocidade e das distâncias de turbulência. Os modelos  $k - \varepsilon$  pertencem a este grupo de modelos e sendo assim os mais utilizados devido à sua força, economia e precisão razoável em um amplo número de escoamentos turbulentos. Como pontos fracos foram descobertos no modelo padrão  $k - \varepsilon$ , surgiram modelos melhorados, como os modelos RNG  $k - \varepsilon$  e Realizable  $k - \varepsilon$ . O modelo  $k - \varepsilon$  assume que o fluxo é totalmente turbulento (SOUZA, 2011).

### 6.1.2 Modelo Standard $k - \varepsilon$

É um modelo de duas equações semi-empírico, onde são introduzidas duas novas variáveis para a modelagem do escoamento, sendo a energia cinética gerada pela turbulência,  $k$  e sua taxa de dissipação  $\varepsilon$ , que são obtidas a partir das seguintes equações de transporte (ALVES, 2010):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (11)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\rho \varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (12)$$

Nestas equações,  $G_k$  representa a geração de energia cinética turbulenta devida aos gradientes da velocidade média, mostrada na equação 10. Por outro lado  $G_b$  diz respeito à energia cinética turbulenta gerada devido a efeitos de flutuabilidade.  $Y_m$  representa a contribuição da dilatação flutuante em turbulência compressível.

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial x_j}{\partial x_i} \quad (13)$$



A viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , é calculada combinando  $k$  e  $\varepsilon$  como demonstrado pela equação 14 (SOUZA, 2011).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (14)$$

De acordo com Souza (2011), neste modelo  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$  e  $C_\mu$  são constantes,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são os números de Prandtl turbulentos para  $k$  e  $\varepsilon$  respectivamente e  $S_k$  e  $S_\varepsilon$  são valores de fontes de calor definidas pelo usuário. Estas constantes possuem os seguintes valores:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44, C_{2\varepsilon} = 1,92, C_\mu = 0,09, \sigma_k = 1,0, \sigma_\varepsilon = 1,3 \quad (15)$$

### 6.1.3 Modelo RNG $k - \varepsilon$

Este modelo se assemelha ao modelo Standard  $k - \varepsilon$ , porém baseado em pontos fracos encontrados no modelo anterior fez com que fossem incluídos alguns refinamentos que o tornam mais preciso e seguro, principalmente para um maior número de escoamentos. Este modelo é derivado das equações de Navier-Stokes utilizando uma técnica matemática chamada "grupo de renormalização". A derivação analítica resulta em um modelo com diferentes constantes ( $C_{1s}$  e  $C_{2s}$ ) do modelo Standard, com alguns termos adicionais e diferentes funções nas equações de transporte, conforme as equações 16 e 17. (SOUZA, 2011).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (16)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (17)$$

Segue o mesmo do modelo Standard  $k - \varepsilon$  para  $G_k$ ,  $S_k$  e  $S_\varepsilon$ , definidos

anteriormente, porém os valores de  $\alpha_k$  e  $\alpha_\varepsilon$  são os inversos efetivos do número de Prandtl para  $k$  e  $\varepsilon$ , respectivamente. Já as constantes do modelo são:

$$C_{1\varepsilon} = 1,42, C_{2\varepsilon} = 1,68 \quad (18)$$

#### 6.1.4 Modelo Realizable $k - \varepsilon$

O modelo de turbulência Realizable  $k - \varepsilon$  deriva das mesmas equações de transporte do modelo Standard  $k - \varepsilon$ , o termo Realizable aplica-se porque aqui as variáveis  $k$  e  $\varepsilon$  são derivadas de equações exatas, ao contrário do modelo Standard onde  $k$  obtém-se de equações exatas e  $\varepsilon$  de formulações empíricas (CORREIA, 2014).

Para este modelo as equações de transporte são as equações 19 e 20.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (19)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v_\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (20)$$

Vale o mesmo dos outros modelos para  $G_k$ , já  $C_2$  e  $C_{1\varepsilon}$  são constantes e  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são os números turbulentos de Prandtl para  $k$  e  $\varepsilon$ , respectivamente. Neste modelo,  $C_\mu$  não é uma constante. As constantes do modelo são as seguintes:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44, C_2 = 1,9, \sigma_k = 1,0, \sigma_\varepsilon = 1,2 \quad (21)$$

Depois de analisar os modelos, os modelos Standard  $k - \varepsilon$  e Realizable  $k - \varepsilon$  foram aplicados ao trabalho. Os resultados obtidos foram semelhantes e o modelo  $k - \varepsilon$  Realizable se mostrou mais vantajoso, uma vez que os tempos de simulação foram menores, conforme ilustrados na Tabela 4.

**Tabela 4 – Tempo de simulação para cada modelo.**

<b>Modelos</b>	<b>Tempo de simulação</b>
Standard	56 min

Realizável	42 min
------------	--------

Fonte: Autoria Própria, 2018.

## 6.2 SIMULAÇÃO

Foi decidido a realização de um estudo mais simplificado, devido à complexidade da realização de uma simulação completa e do número de variáveis existentes. Utilizando-se então uma geometria simplificada e considerando variáveis principais, como temperatura externa do ambiente e trocas de calor possível das paredes, visando assim à simulação da circulação do ar no interior do mini auditório, localizado no bloco D da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Guarapuava.

## 6.3 MODELAGEM

Inicialmente efetuou-se a modelagem de uma geometria baseando-se no formato encontrado no projeto do mini auditório. Para auxílio desta modelagem consultou-se a planta baixa do bloco D, obtido juntamente com o engenheiro civil da Universidade responsável pelo projeto, tendo assim as medidas necessárias para realização deste desenho, conforme mostra a Figura 5.

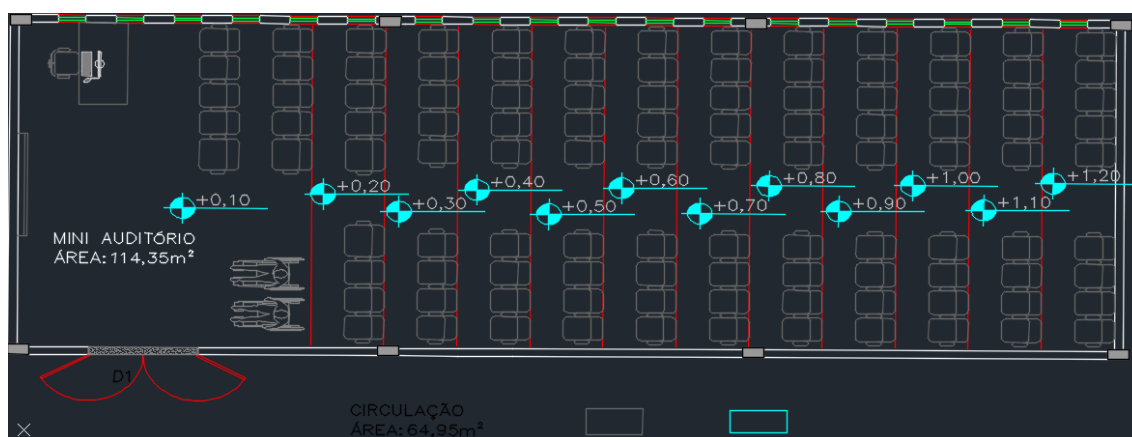
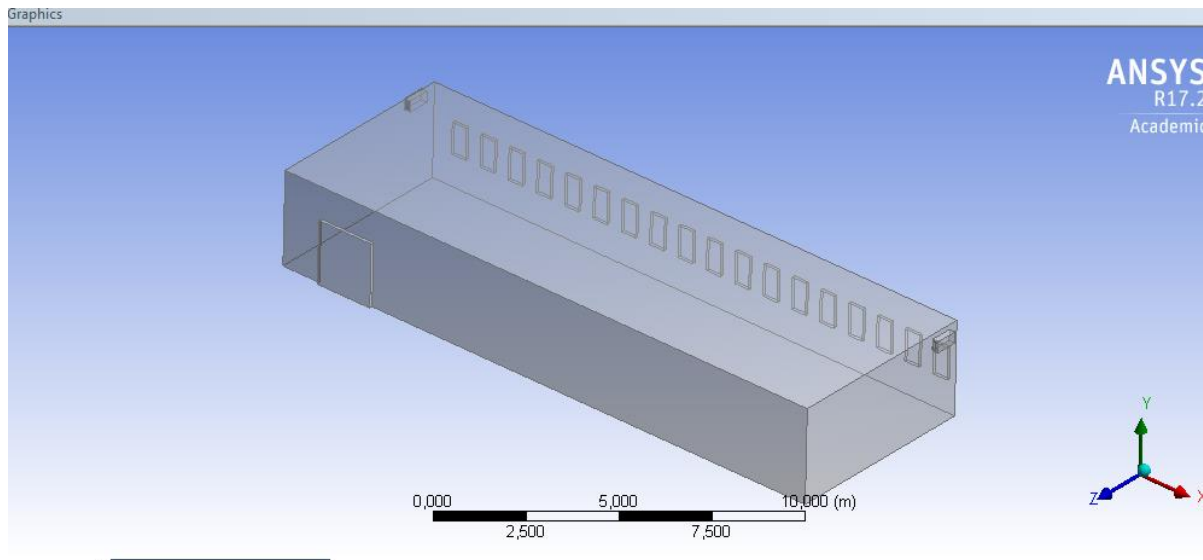


Figura 5 – Planta baixa mini auditório bloco D.

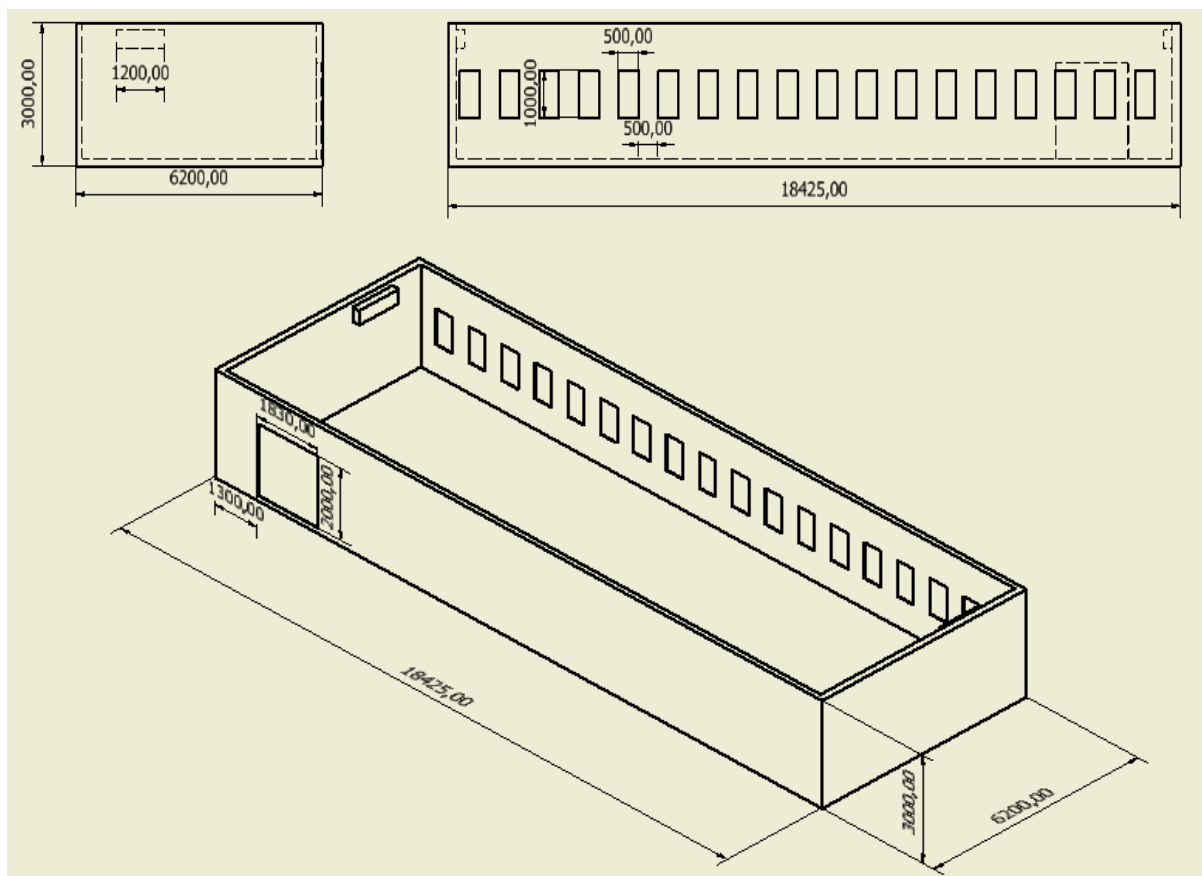
Fonte: UTFPR – Guarapuava, 2018.

Para realização do desenho utilizado na simulação utilizou-se o software *Solid Works*, por obter de forma mais simples uma geometria que mais se aproximasse do projeto real. A geometria obtida se assemelha a um paralelepípedo, conforme ilustra a Figura 6, respeitando algumas distâncias do projeto, como por exemplo, portas, janelas e posição do ar condicionado, as

quais estão demonstradas na Figura 7.



**Figura 6 – Geometria utilizada na simulação.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**



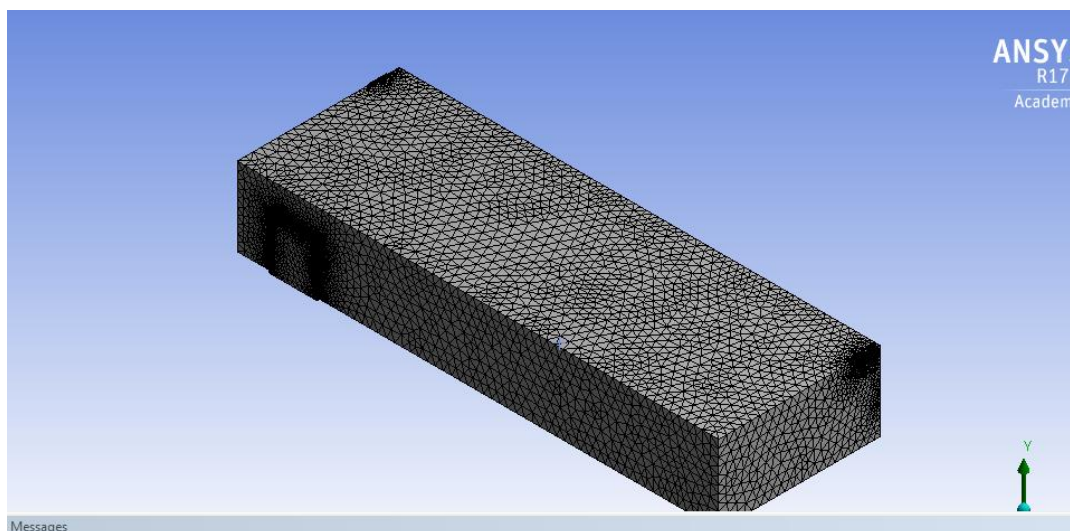
**Figura 7 – Dimensões utilizadas no projeto.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Após importação do desenho para o ANSYS através da ferramenta *DesignModeler* foi necessária a determinação da malha a ser utilizada para a realização da simulação. Para isso foi utilizado o *software Meshing* do próprio ANSYS, onde após diversas tentativas pode-se determinar que a melhor configuração para este estudo se deu com os parâmetros presentes na Tabela 5, a Figura 8 representa a malha obtida com tais configurações.

**Tabela 5 – Parâmetros utilizados no Meshing para o mini auditório.**

Relevance	-7
Size Function	Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Nº de nós	724718
Nº de elementos	509479

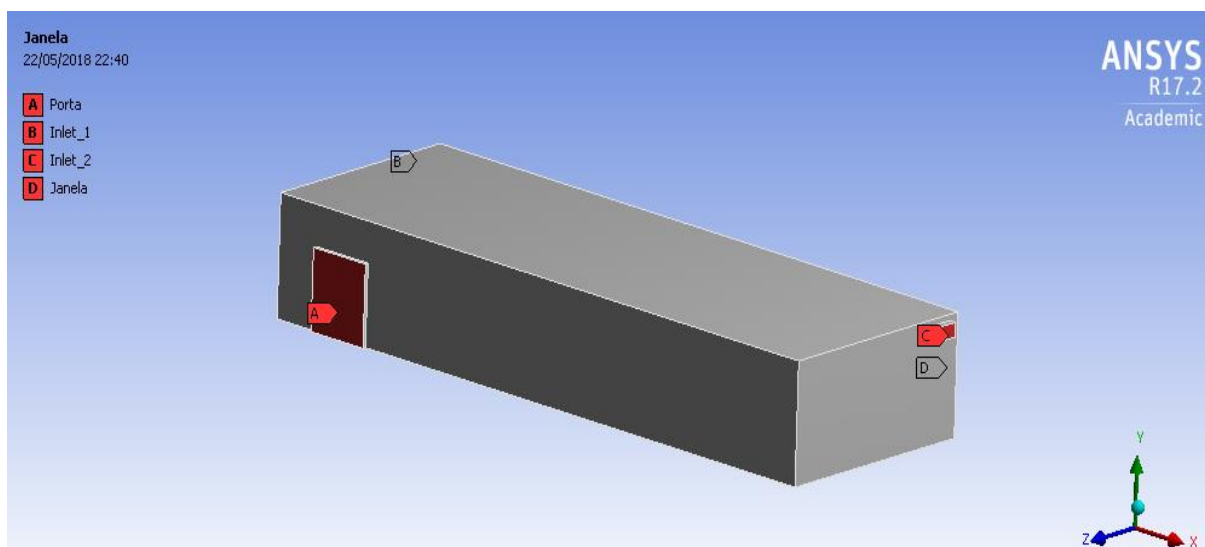
**Fonte: Autoria Própria, 2018.**



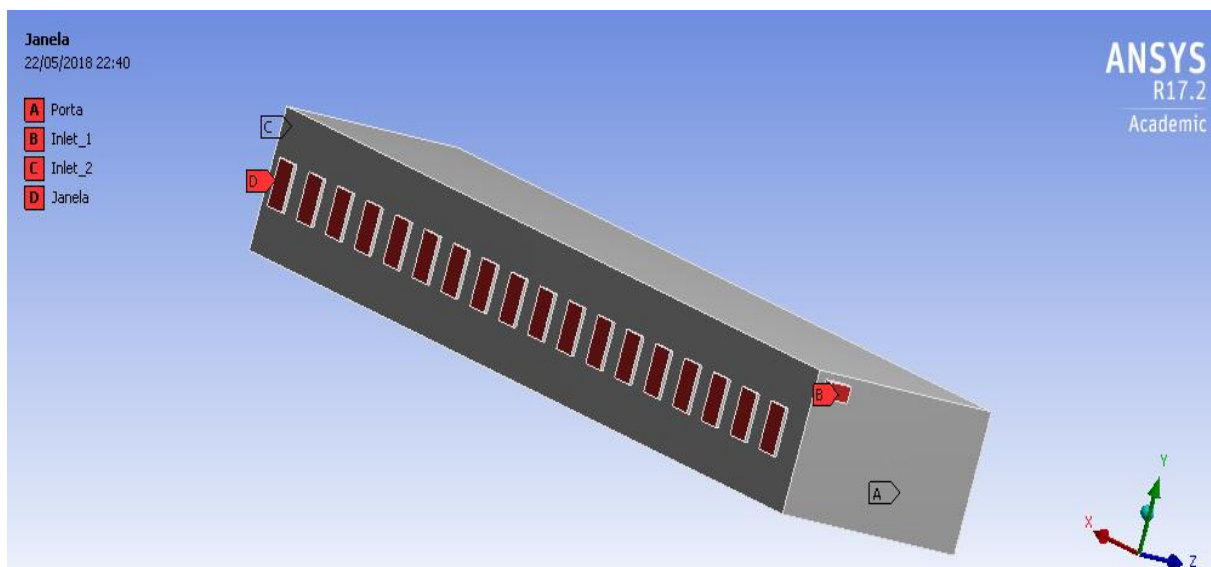
**Figura 8 – Malha utilizada na simulação.**  
**Fonte: Autoria Própria, 2018.**

Vale ressaltar que por se tratar de um *software* acadêmico algumas limitações foram encontradas, principalmente na determinação da malha, como por exemplo, uma limitação no número de elementos da malha, o qual fica limitado a um valor de 512000 elementos, interferindo diretamente na qualidade da malha utilizada nesta simulação.

Ainda no *Meshing* têm-se a necessidade de determinar as superfícies sobre as quais a simulação será realizada para assim definir as condições de fronteira, para este trabalho escolheu-se a determinar apenas a porta, janelas e o ar condicionado, já que as paredes são automaticamente definidas pelo programa através do desenho, as Figuras 9 e 10 demonstram como ficaram tais superfícies.



**Figura 9 – Superfícies determinadas.**  
Fonte: Autoria própria, 2018



**Figura 10 – Superfícies determinadas.**  
Fonte: Autoria própria, 2018.

Com a realização destas etapas preliminares citadas, segue-se para a implementação do modelo e parâmetros a serem utilizados, para isto utilizou-se

o *FLUENT*, também presente no próprio ANSYS. Primeiramente neste software definiu-se a atuação da gravidade no eixo Y, definindo um valor de  $-9,81 \text{ m/s}^2$ , em seguida definiu-se o modelo *Realizable k - ε* com *Standard Wall Functions* (Funções de parede padrão), sendo assim definidas pelo próprio programa todas as constantes necessárias para realização da simulação.

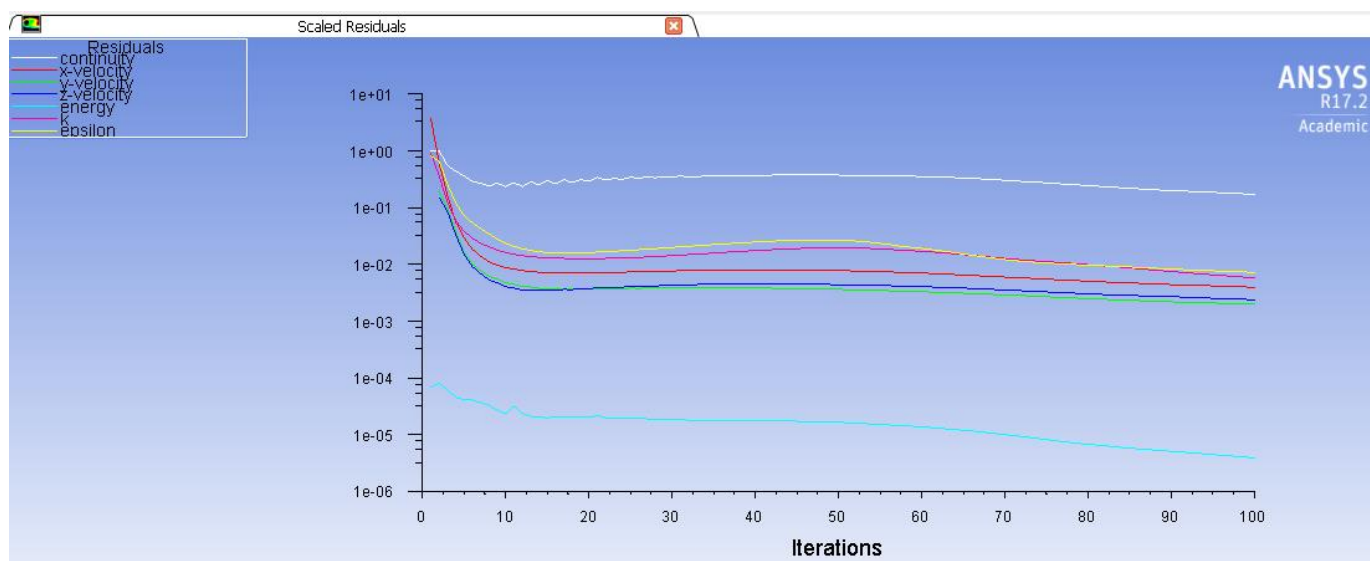
Para determinação da radiação, o ANSYS dispõe de um sistema de localização do ambiente estudado, através de dados de latitude e longitude, respectivamente utilizados valores de  $-25,39^\circ$  e  $-51,46^\circ$ , para cidade de Guarapuava. Este *software* também determina a posição solar para uma simulação mais precisa, através da determinação de datas e horário simulado. Neste trabalho determinou-se o mês de fevereiro, para condições extremas, encontradas durante o verão, o mês julho para condições fracas, encontradas no inverno, e o mês outubro para condições moderadas, encontradas na primavera, considerando sempre o horário das 13:00 horas em todos os casos.

Para determinação das condições de fronteira levou-se em conta uma velocidade de saída do ar de  $2,5 \text{ m/s}$  a uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$  para o ar condicionado, visto que é uma temperatura aceitável para o conforto térmico e exige uma operação razoável do ar condicionado, minimizando alguns gastos, como o gasto com energia elétrica.

Para as janelas determinou-se o vidro como material, definindo valores de densidade de  $2500 \text{ kg/m}^3$ , calor específico de  $670 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  e condutividade térmica de  $0,8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , para paredes e portas definiu-se apenas o material já presente no próprio ANSYS, sendo eles *gypsum* e *wood* respectivamente, onde os dados necessários são automaticamente definidos.

Vale ressaltar que para este trabalho considerou-se as janelas como opacas, minimizando os efeitos da radiação na simulação, visto que o ambiente possui isolamento para minimizar a interferência do som para o ambiente externo, tendo assim as janelas fechadas e com persianas, reduzindo consideravelmente a incidência de luminosidade externa para o interior do ambiente e conseqüentemente favorecendo a manutenção da temperatura.

Após definições de todos os parâmetros necessários escolhe-se o método de solução bem como o número de iterações a ser utilizado pelo *software*, para este estudo utilizou-se um número de 100 iterações, como é apresentado na Figura 11.



**Figura 11 – Iterações realizadas.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Para esta primeira simulação de exemplo, as condições de fronteira foram determinadas aleatoriamente apenas para critério de demonstração de como é realizada a simulação, a Tabela 6 a seguir apresenta as condições de fronteira determinadas.

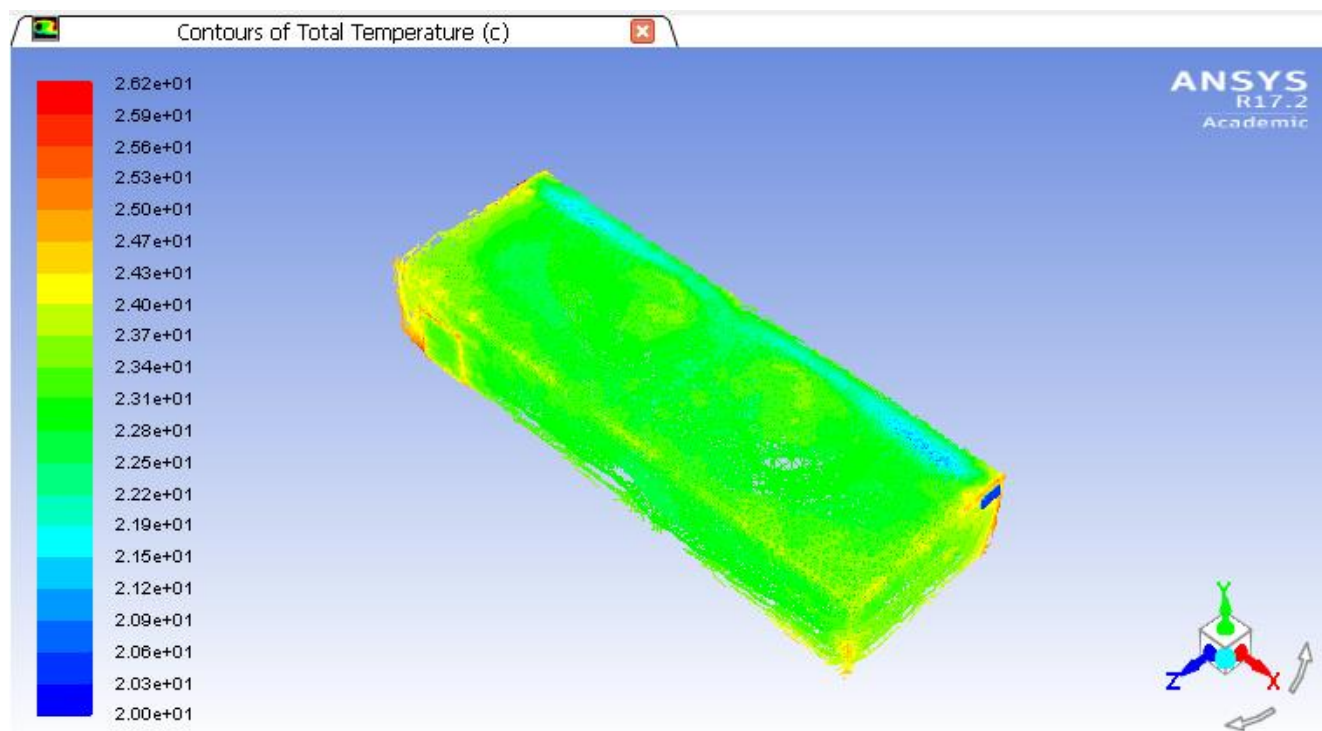
**Tabela 6 – Condições de fronteira para o exemplo.**

	Temperatura (°C)
Ar condicionado	20
Paredes	30
Porta	30
Janelas	30

**Fonte: Autoria Própria, 2018.**

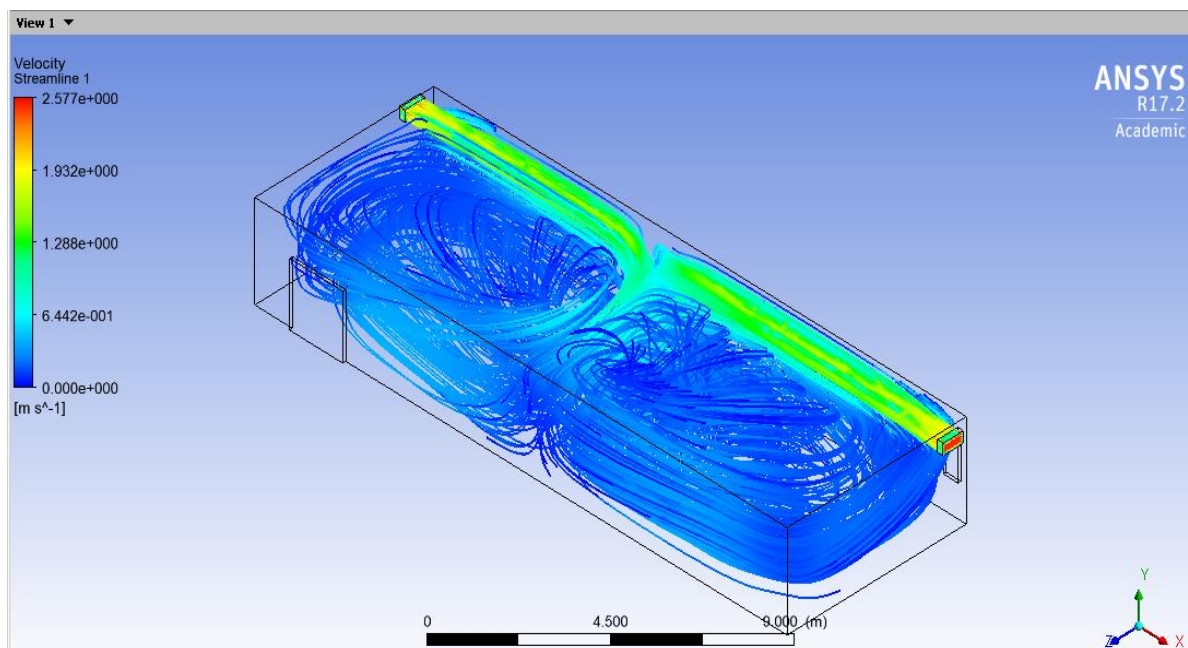
Com o término da realização de todas as iterações é possível à verificação da temperatura média no interior do mini auditório, através de gráficos gerados pelo próprio *software*. Analisando alguns desses gráficos verificou-se que a temperatura no interior do mini auditório após a simulação se manteve entre 22,0°C e 23,0°C devido à circulação de ar frio gerada pelo ar condicionado, conforme ilustra a Figura 12 abaixo.





**Figura 12 – Gráfico da temperatura total no interior do mini auditório.  
Fonte: Autoria própria, 2018.**

Através do software também é possível verificar as linhas de velocidade da circulação do ar no interior do mini auditório, tais linhas foram obtidas no programa *CFD-Post*, incluso também no ANSYS. A Figura 13 demonstra uma possível configuração da disposição destas linhas de circulação do ar vindas do ar condicionado, bem como a velocidade que as mesmas circulam no interior do mini auditório.



**Figura 13 – Gráfico da circulação do ar.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Apesar de se tratar de uma simulação mais simplificada é possível notar através das linhas de velocidade, que o ar circula no ambiente com uma velocidade satisfatória para o conforto de seus ocupantes, já que, segundo a norma ISO 7730 (2005) o índice aceitável para velocidade do ar neste tipo de ambiente está em torno de 0,2 m/s.

Para critério de comparação serão realizadas três simulações, baseadas nesta primeira apresentada, para avaliar o comportamento e o conforto térmico em três situações distintas, condições de verão, primavera e inverno, baseado em temperaturas e parâmetros aproximados para os encontrados na região de Guarapuava, onde está localizado o objeto de estudo, durante as fases respectivas do ano.

#### 6.4 CONDIÇÃO DE VERÃO

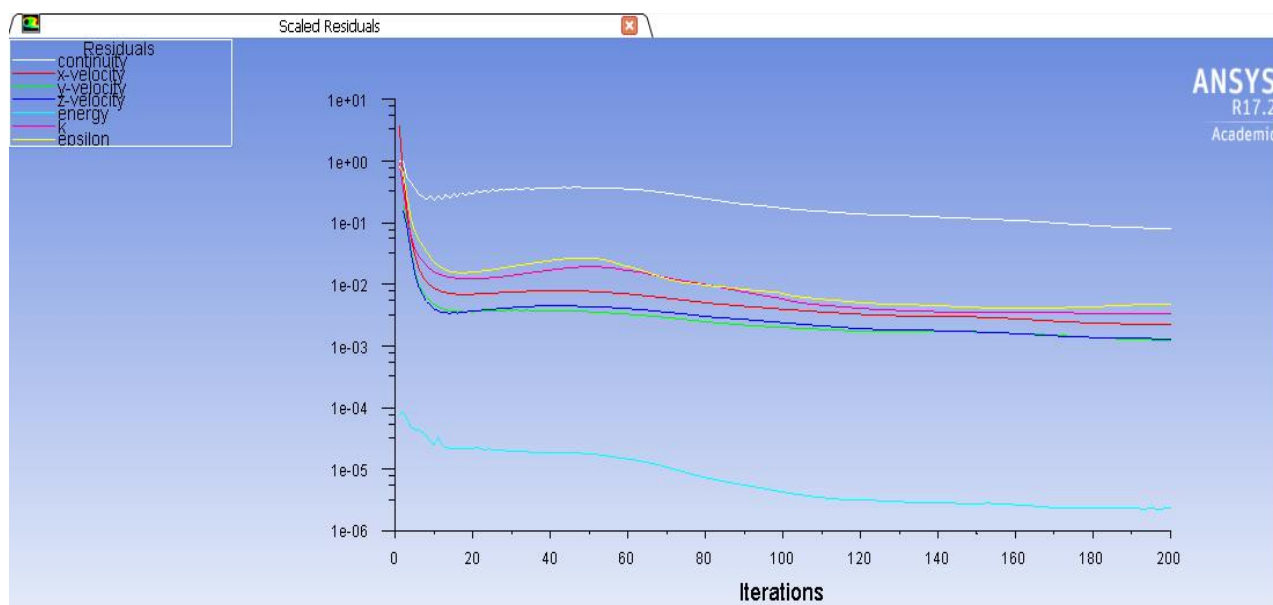
Para a simulação destas condições, onde podem ser encontradas durante o verão foram definidas condições de fronteira com temperaturas aproximadas, sendo consideradas algumas temperaturas externas do ambiente onde o mini auditório está localizado. Tais condições de fronteira estão apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7 – Condições de fronteira para condição de verão.**

	Temperatura (°C)
Ar condicionado	20
Paredes	33
Porta	30
Janelas	33

Fonte: Aatoria Própria, 2018.

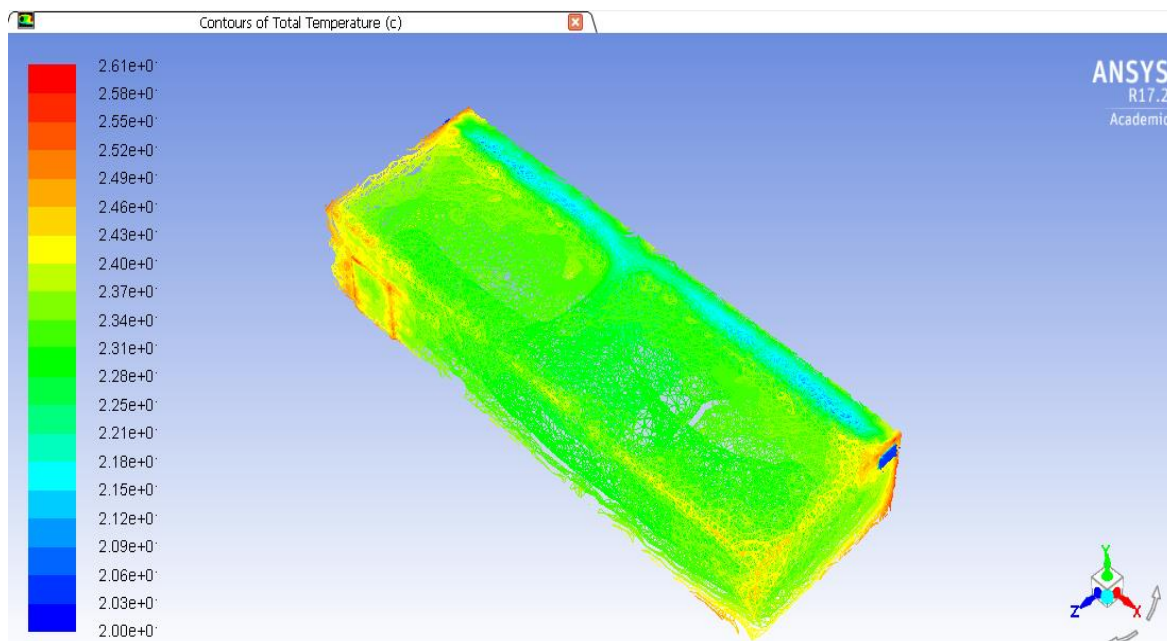
Com estas condições de fronteira foi realizada a simulação, no *FLUENT*, da mesma forma como definida anteriormente na primeira simulação, porém desta vez definiu-se um número de 200 iterações, visando encontrar um intervalo mais preciso na temperatura encontrada no interior do mini auditório, a Figura 14 demonstra o número de iterações.



**Figura 14 – Gráfico numero de iterações condições de verão.**

Fonte: Aatoria própria, 2018.

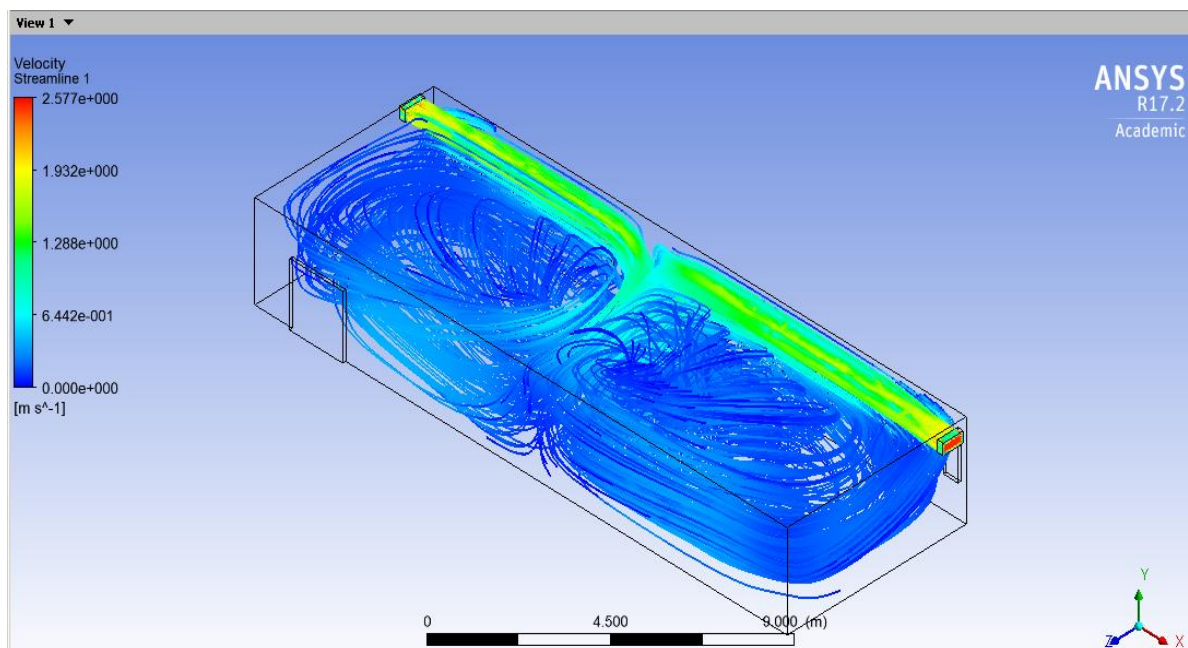
Analisando o gráfico da temperatura no interior do mini auditório obtido ao término da simulação é possível verificar que a temperatura média ficou entre 22°C e 23°C, conforme ilustra a Figura 15.



**Figura 15 – Gráfico temperatura condição de verão.  
Fonte: Autoria própria, 2018.**

Para estas condições de fronteira a temperatura obtida se encontra dentro do aceitável para a condição de conforto térmico, onde recomendam-se temperaturas em torno de 21°C. Visto que os indivíduos em seu interior podem ser considerados em atividade sedentária, onde sua maioria estará sentada sem realizar nenhum esforço, esta temperatura poderá ser considerada agradável para grande parte de seus usuários. Uma exceção pode ser ao palestrante, no qual se encontra geralmente de pé, porém o mesmo pode ser considerado em uma atividade leve, onde a temperatura encontrada poderá gerar também a situação de conforto para ele.

É possível notar também que a velocidade de circulação do ar no interior do mini auditório também se manteve dentro dos limites aceitáveis já mencionados na simulação anterior, contribuindo dessa maneira para manter o conforto no ambiente. A velocidade e distribuição do ar estão ilustrados na Figura 16.



**Figura 16 – Gráfico da circulação do ar condição de verão.**  
**Fonte: Aatoria própria, 2018.**

## 6.5 CONDIÇÃO DE PRIMAVERA

Para a simulação de tais condições, as quais podem ser encontradas durante a primavera, por exemplo, foram definidas condições de fronteira, da mesma forma como a condição anterior já citada, porém com valores de temperatura externa diferentes, mas mantendo a temperatura do ar condicionado, demonstradas na Tabela 8.

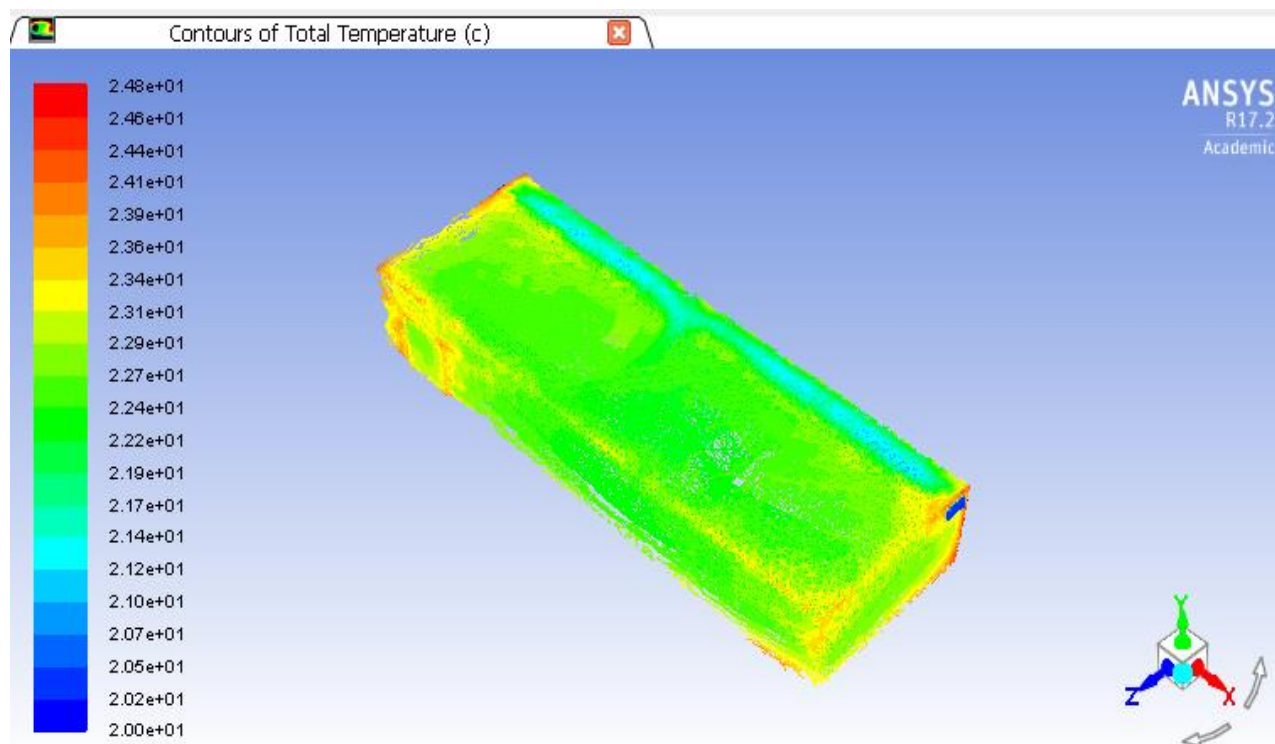
**Tabela 8 – Condições de fronteira para condição de primavera.**

	Temperatura (°C)
Ar condicionado	20
Paredes	25
Porta	22
Janelas	25

**Fonte: Aatoria Própria, 2018.**

Com estas condições de fronteira foi realizada novamente a simulação, com as mesmas 200 iterações, obtendo novos resultados.

Da mesma forma analisando os gráficos de temperatura no interior do mini auditório é possível verificar que a temperatura média ficou em torno de 22°C, assim como nota-se na Figura17.



**Figura 17 – Gráfico temperatura condição de primavera.  
Fonte: Autoria própria, 2018.**

Com isso é possível afirmar que o ambiente se encontra em conforto térmico para seus ocupantes, visto que se encontra uma temperatura amena, em torno de 22°C, no interior do mini auditório, para estas condições de fronteira determinadas.

## 6.5 CONDIÇÃO DE INVERNO

Para esta simulação, onde tal condição pode ser encontrada durante o inverno, foram definidas novamente as condições de fronteira, com valores de temperatura externa diferentes das demais apresentadas, porém para esta situação considerou se considerou o ar condicionado esquentando o ambiente, conforme demonstra a Tabela 9.

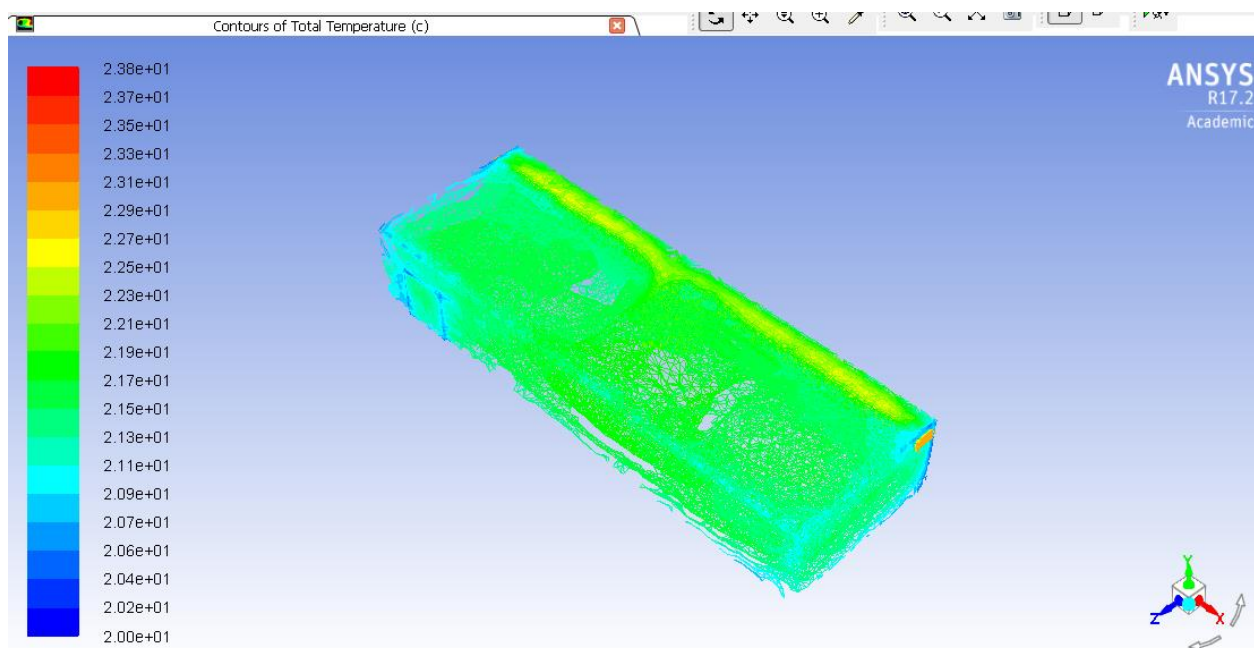
**Tabela 9 – Condições de fronteira para condição de inverno.**

	Temperatura (°C)
Ar condicionado	23
Paredes	15
Porta	15
Janelas	15

Fonte: Aatoria Própria, 2018.

Com estas condições de fronteira foi realizada novamente a simulação, com as mesmas 200 iterações, obtendo novos resultados.

Da mesma forma analisando os gráficos de temperatura no interior do mini auditório é possível verificar que a temperatura média ficou entre 21°C e 22°C, assim como nota-se na Figura 18.



**Figura 18 – Gráfico temperatura condição de inverno.**  
 Fonte: Aatoria própria, 2018.

Sendo assim possível afirmar que mesmo com a temperatura ambiente menor que a temperatura de saída do ar no interior do mini auditório o ambiente consegue manter-se em conforto térmico para seus ocupantes, já que mantém uma temperatura amena no interior do mini auditório, da mesma forma que nas outras situações.

Por fim, em todas as condições determinadas, sendo elas de calor ou frio, notou-se que o ambiente se comportou dentro de um limite aceitável de conforto

térmico, com esta disposição de ar condicionado apresentada, mantendo sempre uma temperatura próxima da temperatura de saída do ar condicionado. Valendo ressaltar que para atividade que está designado este ambiente seus ocupantes estariam em situação de conforto em sua maioria, validando assim o projeto.



## 7 CONCLUSÃO

Para realização deste trabalho uma série de dificuldades precisou ser superada, como por exemplo, a utilização do software através de sua melhor maneira, devido a escassez de informações sobre mesmo, por se tratar de um software novo e com uma gama vasta de opções. Sendo assim necessária a realização de uma série de simplificações em todas as etapas para atingir uma simulação minimamente aceitável para análise de seus resultados.

Em termos dos resultados encontrados, pode-se concluir que com uma simulação bastante simplificada o ambiente se encontra em conforto térmico para a maioria de seus ocupantes, analisando os dados de temperatura. Visto que a temperatura no interior do mini auditório encontra-se em valores aceitáveis para a situação de conforto em sua principal atividade.

É possível deixar como sugestão para trabalhos futuros um estudo mais aprofundado do caso, como por exemplo a realização de uma geometria mais precisa, ou, com uma malha melhor refinada, embora a limitação da licença estudantil interfira diretamente no refinamento da malha, bem como também a determinação de outros parâmetros para condições de fronteira, podendo assim avaliar outros fatores importantes no resultado, como velocidade do ar, umidade do ar no interior do mini auditório, entre outros. Tendo assim uma forma de verificar se tais resultados obtidos nas simulações são realmente precisos e próximos do que é encontrado na realidade.

## REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Norma 02:136.01-001. **Desempenho de edifícios habitacionais de até 5 pavimentos**. Rio de Janeiro. 2007.
2. ALVES, F. A. Rui. **Simulação Numérica da Ventilação num Auditório**. 2010. Dissertação de Mestrado Integrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2011.
3. AULICIEMS, A., SZOKOLAY, S. V. **Thermal Comfort**. Kenmore: 1997. University of Queensland – Department of Architecture.
4. ARAÚJO, V.M.D. **Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares no litoral nordestino brasileiro**. 1996. 179 f. Tese de Doutorado – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.
5. ASHRAE Standard 90.2-2004 – **Energy Efficient Design of Low – Rise Residential Buildings**. 2004c.
6. ASHRAE Standard 90.2-2004 - **Energy Efficient Design of Low – Rise Residential Buildings**. SI. ed. Atlanta, Ga: American Society of Heating Refrigerating and Air – Conditioning Engineers, 2004.
7. BITTENCOURT, L., CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. Maceió. EDUFAL, 2005.
8. BRODAY, E. Evandro. **Análise Comparativa Entre os Métodos de Determinação da Taxa Metabólica Visando e Equilíbrio Entre o Homem e o Ambiente** 2013. Dissertação de Mestrado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2011.
9. CORREIA, R. D. R. Ismael. **Caracterização aerodinâmica de uma pá para rotor de micro-eólica**. 2014. Dissertação de Mestrado – Universidade do Minho - Escola de Engenharia. Minho, 2014.
10. ÇINAR, N. D: FILIZ, T. M. **Neonatal Thermoregulation**. Journal of Neonatal Nursing, v.12, n.2, p.69 – 74, abr. 2006
11. DEAR, R J., BRAGER, G.S. **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference**. ASHRAE Transactions. Atlanta: v.104, p.145 – 167, 1998.
12. FANGER, P. O. **Thermal comfort: analysis and applications in**

**environmental engineering**. New York: Mc Graw – Hill Book Company, 1970.

13. FANGER, P. O. **Thermal Comfort**. United States: Mc Graw - Hill Book Company, 1972.

14. FIALA, D. **Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort**. 1998. Tese de Doutorado – Montfort University Leicester. Leicester, 1998.

15. FRANK, S. M, RAJA, S. N., BULCAO, C. F., GOLDSTEIN, D. S. **Relative contribution of core and cutaneous temperatures to thermal comfort autonomic responses in humans**. Journal of Applied Physiology. v. 86(5), p. 1588 – 1593, 1999.

16. FROTA, Anésia, B; SCHIFFER, Sueli, R. **Manual do Conforto Térmico**. 5 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

17. GAGGE, A. P. **The role of Humidity during warm discomfort**. In: INDOOR CLIMATE. Ed. Fanger. P. O. e O. Valbjom – Danish Building Research Institute. Copenhagen. 1971. p. 527 – 538.

18. HAYWARD, J. S., ECKERSON, J. D., COLLIS, M., L. **Thermoregulatory heat production in man: prediction equation based on skin and core temperatures**. Journal of Applied Physiology: v.42, p. 377 – 384, 1977.

19. HOUGHTEN, F. C., YAGLOGLOU, C. P. **Determination of Comfort Zone**. Transactions ASHVE. p.29 – 361, 1923.

20. HUMPHREYS, M. A.; NICOL, J. F. **The validity of ISO – PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments**. Energy and Buildings [S.l], v.34, n. 6, p. 667 – 684, jul 2002.

21. **ISO 7730 (2005)** “Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria”. Geneva.

22. KROEMER, Karl. H. E; GRANDJEAN, Etienne. **Manual de Ergonomia: adaptando o trabalho ao homem**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

23. LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: PW Editores. 1997.

24. LAMBERTS, Roberto et al. **Designing an Energy Efficient Demonstration House for Foz do Iguaçu, Southern Brazil**. In: PROCEEDINGS OF THE PLEA99' CONFERENCE, 22-24 September, Brisbane / Austrália. 1999.

25. LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 2 ed. São Paulo: PW Editores. 2003.
26. LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3 ed. São Paulo: PW Editores. 2014.
27. MOUJALLED, B. et al. **Comparison of thermal comfort standards in the hot – humid tropics**. Energy and Buildings [S.l.], v.36, n.7, p.628 – 637, jul 2004.
28. NBR15220-3/2005 – **Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005c.
29. NICOL, F. A. **Handbook for Field Studies Toward an Adaptive Model**. Londres: University of East London, 1993.
30. NICOL, F. **Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics**. Energy and Buildings [S.l.], v.36, n.7, p. 628 – 637, 2004.
31. OLIVEIRA, A. G. D. **Proposta de método para avaliação do desempenho térmico de residências unifamiliares em clima quente – úmido**. 2006. Mestrado – Programa de Pós – Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2006.
32. PEDRINI, A. **Desenvolvimento de Metodologia de Calibração de Modelos para Simulações Térmica e Energética de Edificações**. 1997. 186 f. mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997. Disponível em: <  
[http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISSERT\\_ACAO\\_Aldomar\\_Pedrini.pdf](http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISSERT_ACAO_Aldomar_Pedrini.pdf)>. Acesso em: 28 set. 2016.
33. ROHLES, F. H; NEVINS, R. G. **The Nature of Thermal Comfort for Sedentary Man**. ASHRAE Transactions. Atlanta; v.77, n.1, p. 239, 1971.
34. RUAS, A. César. **Avaliação de conforto térmico – contribuição à aplicação prática das normas internacionais**. 1999. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1999.
35. SANTAMOURIS, M; WOUTERS, P. **Building ventilation: the state of the art**. London, Sterling, VA: Earthscan, 2006.
36. SCHIMID, A. Leoni. **A Ideia de Conforto: Reflexões sobre o ambiente**

**construído.** Curitiba: Pacto Ambiental, 2005.

37. SNYDER, James C; CATANESE, Anthony. **Introdução à Arquitetura.** Rio de Janeiro: Campus Ltda., 1984.

38. SOUZA, C. Ivone. **Simulação do escoamento de ar no auditório da FEUP.** 2011. Dissertação de Mestrado Integrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2011.

39. TANABE, S. **Thermal Comfort Requirements in Japan.** 1988. Tese de Doutorado – Waseda University. Waseda, 1988.

40. TOLEDO, A. **A contribuição da orientação e do sombreamento na composição das cargas e no consumo final de energia elétrica de um edifício de escritórios climatizados.** In: VII Encontro Nacional e III Conferência Latino – Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações. Curitiba, 2003.

41. VERNON, H. M; WARNER, C. G. **The influence of humidity of the air on capacity of work at high temperatures.** Journal of Hygiene. Cambridge, 1932. p. 32 – 431.

42. XAVIER, Antônio A. de P. **Condições de conforto térmico para estudantes de 2º grau na região de Florianópolis.** 1999. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.