

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



## **Simulação Computacional de um sistema de ventilação natural na Universidade do Gana**

Francisco José Lopes Pereira

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e Ambiente**

Dissertação orientada por:

Professor Doutor Guilherme Carrilho da Graça, FCUL

2017

## Resumo

O tempo que o ser humano depende no interior de edifícios tem aumentado significativamente, e com esse aumento, surge também a necessidade de um melhor controlo na qualidade do seu ar. Presentemente, os sistemas mecânicos são preponderantes aquando das escolhas da população para climatização de espaços, o que aumentou conseqüentemente o consumo energético dos edifícios durante a última década. Existem, porém, diversas opções para contrariar esta decisão, dando ênfase à ventilação natural, devido à sua capacidade de climatizar e renovar o ar dos espaços sem consumo de energia e com uma conseqüente redução dos custos. Esta dissertação de mestrado expõe propostas de sistemas de ventilação natural por deslocamento de ar vertical para um edifício ainda em fase de projeto na Universidade do Gana. Foram realizadas simulações dinâmicas através do *software EnergyPlus* para simular deslocamentos de ar vertical com um modelo de três-nós implementado no código. As simulações foram executadas consoante os requisitos do projeto e foi disponibilizada toda a informação com todos os parâmetros que tinham sido requisitados. Os resultados de temperaturas no interior das salas de aula, juntamente com a temperatura máxima que os ocupantes conseguiriam suportar foram posteriormente comparadas através da utilização de um modelo adaptativo. Os resultados demonstram que existe uma melhoria significativa do conforto térmico e da qualidade do ar no seu interior aquando da implementação dos sistemas de ventilação natural, relativamente ao projeto inicial. As temperaturas no interior da sala variam bastante consoante as diferentes orientações do edifício sendo que são significativamente superiores na fachada orientada a Oeste e nas salas do piso superior. Apesar das diversas simulações efetuadas, constrangimentos económicos fizeram com que nenhuma das opções fosse viável, sendo posteriormente alterado apenas a configuração das janelas.

**Palavras-Chave:** Simulação Dinâmica; Ventilação natural, Edifício, *EnergyPlus*.

## **Abstract**

Time that Human beings spend inside buildings has increased significantly and consequently so the need for proper air quality control. Nowadays, mechanical systems have been preponderant in the choices of the population for air conditioning, which consequently increased the energy consumption of buildings in the last decade. However, there are several options to counter this measure highlighting the natural ventilation solutions that are able to respond to the needs of air conditioning of the vast majority of the cases, bringing a high reduction of the associated costs. This dissertation exposes several proposals for natural ventilation by vertical air movement for a building still in the design phase in the University of Ghana. Dynamic simulations were performed using the EnergyPlus software to simulate vertical air displacement systems with a three-node model implemented in the code. These simulations were conducted for all the requests of the project and the results were made known for all parameters requested. The results of the temperature inside the classrooms were compared with the maximum temperature that the occupants would be able to withstand using an adaptive model. The results show that there is a significant improvement in indoor air quality and temperature when natural ventilation systems are implemented, compared to the initial design. Temperatures inside the classrooms vary greatly with the different orientations of the building. These differences are more significant on the West-facing façade and upstairs classrooms. Despite the large amount of dynamical simulations performed, economic constraints made none of the options feasible and a change in the windows configurations was later added.

**Keywords:** Dynamic Simulation, Natural Ventilation, Building, Energy Plus.

## Índice

Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Índice de figuras.....	v
Índice de gráficos.....	vi
Índice de tabelas.....	vii
Agradecimentos.....	viii
1 Capítulo 1 - Introdução.....	9
1.1 Objetivos.....	10
1.2 Questões de investigação.....	10
1.3 Estrutura da tese.....	10
2 Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica.....	12
2.1 Transferência de Calor.....	12
2.1.1 Radiação.....	13
2.1.2 Condução.....	13
2.1.3 Convecção.....	14
2.2 Balanço de Energia em Edifícios.....	15
2.3 EnergyPlus.....	16
2.4 Conforto térmico.....	19
2.5 Displacement Ventilation.....	20
3 Capítulo 3 - Caso de estudo.....	23
3.1 Definição e Localização.....	23
3.2 Ocupação.....	24
3.3 Ficheiro climático.....	25
3.3.1 Radiação Solar.....	26
3.3.2 Humidade relativa.....	28
3.3.3 Ventilação.....	29
4 Capítulo 4 – Modelos de Estudo.....	30
4.1 Definição dos modelos.....	30
4.2 Simulações Dinâmica em EnergyPlus.....	32
4.2.1 Modelo 1.....	33
4.2.2 Modelo 2.....	35
4.2.3 Modelo 3.....	36
4.2.4 Modelo 4.....	40
5 Capítulo 5 - Resultados.....	41
5.1 Configuração Final.....	58
6 Capítulo 6 - Conclusão.....	62
7 Capítulo 7 - Referências Bibliográficas.....	63

## Índice de figuras

Figura 1: Mecanismos de transferência de calor por radiação, condução e convecção, adaptado. [10]	12
Figura 2: Sentido do fluxo de calor para um gradiente de temperatura unidirecional [8]	14
Figura 3: Etapas associadas à simulação de um modelo em EnergyPlus (Adaptado de Mateus, 2012) [5].	18
Figura 4: Intervalo de temperatura de conforto	20
Figura 5: Sistema de ventilação utilizado em distribuição de ar misturado	21
Figura 6: Sistema de ventilação utilizado em distribuição de ar estratificado	21
Figura 7: Imagem aérea de enquadramento da zona de estudo	23
Figura 8: Modelo da fachada da Universidade	24
Figura 9: Planta do piso inferior e superior do edifício	30
Figura 10: Modelo utilizado na simulação das salas de aula	31
Figura 11: Zonas fronteira do edifício	31
Figura 12: Modelo 1	34
Figura 13: Esquema de ventilação utilizado no modelo 1	35
Figura 14: Modelo 2	36
Figura 15: Modelo 3	37
Figura 16: Esquema de ventilação utilizado no modelo 3	38
Figura 17: Esquema com áreas de abertura para o modelo 3	39
Figura 18: Modelo 4	40
Figura 19: Modelo de janela basculante a ser implementada na universidade	58
Figura 20: Configuração final do modelo a ser utilizado	59
Figura 21: Esquema de ventilação final para um dia normal	60
Figura 22: Esquema de ventilação final para um dia quente	60

## Índice de gráficos

Gráfico 1: Percentagem de horas anuais de intervalos de temperatura .....	26
Gráfico 2: Temperaturas médias anuais e respetivos limites para o modelo adaptativo .....	26
Gráfico 3: Radiação média anual incidente na cidade de Acra. ....	28
Gráfico 4: Percentagem de horas anual de valores de humidade relativa .....	28
Gráfico 5: Distribuição horaria anual da orientação do vento.....	29
Gráfico 6: Perfil médio diário da velocidade do vento.....	29
Gráfico 7: Temperaturas da fachada Sul para o piso superior, 1º semestre .....	41
Gráfico 8: Temperaturas da fachada Sul para o piso superior, 2º semestre .....	41
Gráfico 9: Temperaturas da fachada Sul para o piso inferior, 1º semestre.....	42
Gráfico 10: Temperaturas da fachada Sul para o piso inferior, 2º semestre.....	42
Gráfico 11: Temperaturas da fachada Oeste para o piso superior 1º semestre.....	42
Gráfico 12: Temperaturas da fachada Oeste para o piso superior 2º semestre.....	43
Gráfico 13: Temperaturas da fachada Norte para o piso superior 1º semestre.....	43
Gráfico 14: Temperaturas da fachada Norte para o piso superior 2º semestre.....	43
Gráfico 15: Temperaturas da fachada Norte para o piso inferior 1º semestre.....	44
Gráfico 16: Temperaturas da fachada Norte para o piso inferior 2º semestre.....	44
Gráfico 17: Temperaturas da fachada Sul para o piso superior 1º semestre, modelo 2.....	45
Gráfico 18: Temperaturas da fachada Sul para o piso superior 2º semestre, modelo 2.....	45
Gráfico 19: Temperaturas da fachada Sul para o piso inferior 1º semestre, modelo 2.....	46
Gráfico 20: Temperaturas da fachada Sul para o piso inferior 2º semestre, modelo 2.....	46
Gráfico 21: Temperaturas da fachada Norte para o piso superior 1º semestre, modelo 2.....	46
Gráfico 22: Temperaturas da fachada Norte para o piso superior 1º semestre, modelo 2.....	47
Gráfico 23: Temperaturas da fachada Norte para o piso inferior 1º semestre, modelo 2.....	47
Gráfico 24: Temperaturas da fachada Norte para o piso inferior 2º semestre, modelo 2.....	47
Gráfico 25: Temperaturas da fachada Oeste para o piso superior 1º semestre, modelo 2.....	48
Gráfico 26: Temperaturas da fachada Oeste para o piso superior 2º semestre, modelo 2.....	48
Gráfico 27: Temperaturas para a fachada Sul para o piso superior 1º semestre, modelo 3.....	49
Gráfico 28: Temperaturas da fachada Sul para o piso superior 2º semestre, modelo 3.....	49
Gráfico 29: Temperaturas da fachada Sul para o piso inferior 1º semestre, modelo 3.....	49
Gráfico 30: Temperaturas da fachada Sul para o piso inferior 2º semestre, modelo 3.....	50
Gráfico 31: Temperaturas da fachada Oeste para o piso superior 1º semestre, modelo 3.....	50
Gráfico 32: Temperaturas da fachada Oeste para o piso superior 2º semestre, modelo 3.....	50
Gráfico 33: Temperaturas da fachada Norte para o piso superior 1º semestre, modelo 3.....	51
Gráfico 34: Temperaturas da fachada Norte para o piso superior 2º semestre, modelo 3.....	51
Gráfico 35: Temperaturas da fachada Norte para o piso inferior 1º semestre, modelo 3.....	52
Gráfico 36: Temperatura da fachada Norte para o piso inferior 2º semestre, modelo 3.....	52
Gráfico 37: Temperatura da fachada Sul para o piso superior 1º semestre, modelo 4.....	52
Gráfico 38: Temperatura da fachada Sul para o piso superior 2º semestre, modelo 4.....	53
Gráfico 39: Temperatura da fachada Sul para o piso inferior 1º semestre, modelo 4.....	53
Gráfico 40: Temperatura da fachada Sul para o piso inferior 2º semestre, modelo 4.....	53
Gráfico 41: Temperatura da fachada Oeste para o piso superior 1º semestre, modelo 4.....	54
Gráfico 42: Temperatura da fachada Oeste para o piso superior 2º semestre, modelo 4.....	54
Gráfico 43: Temperatura da fachada Norte para o piso superior 1º semestre, modelo 4.....	55
Gráfico 44: Temperatura da fachada Norte para o piso superior 2º semestre, modelo 4.....	55
Gráfico 45: Temperatura da fachada Norte para o piso inferior 1º semestre, modelo 4.....	55
Gráfico 46: Temperatura da fachada Norte para o piso inferior 2º semestre, modelo 4.....	56

## Índice de tabelas

Tabela 1: Calendário escolar da Universidade do Gana para o ano 2015/2016 .....	24
Tabela 2: Horário de ocupação de uma sala para dia de aulas .....	25
Tabela 3: Lista de modelos simulados e as respetivas alterações.....	32
Tabela 4: Características dos materiais de construção .....	33
Tabela 5: Características dos vãos envidraçados.....	34
Tabela 6: Áreas de abertura do modelo 3.....	39
Tabela 7: Percentagem de horas de desconforto para o modelo 1.....	56
Tabela 8: Percentagem de horas de desconforto para o modelo 2.....	56
Tabela 9: Percentagem de horas de desconforto para o modelo 3.....	57
Tabela 10: Percentagem de horas de desconforto para o modelo 4.....	57
Tabela 11: Áreas de aberturas da configuração final .....	59

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais e à minha irmã por todo o apoio, carinho e conselhos que prontamente se prestaram a dar em todos os momentos da minha vida. A vossa motivação constante foi determinante para que conseguisse terminar este projeto.

À Mafalda por todo o apoio incansável, a amizade e a enorme cumplicidade demonstrada ao longo de todos estes anos. As inúmeras palavras de incentivo que me possibilitaram chegar mais longe foram algo que nunca irei esquecer. A tua presença, em todos os momentos, foi determinante ao longo destes anos e ficará para sempre guardada como uma prova de carinho que nos une.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador, Professor Doutor Guilherme Carrilho da Graça por toda a ajuda que me deu no decorrer da realização do projeto. Todos os conhecimentos que transmitiu, as opiniões, mas sobretudo as críticas fizeram com que o trabalho ficasse melhor.

Um enorme obrigado também ao Nuno Mateus que foi um pilar extremamente importante no decorrer do projeto. O apreço demonstrado, a sua amizade e conhecimento fizeram com que o projeto tomasse o caminho correto.

À Filipa Silva e ao Daniel Albuquerque que conseguiram estar nos momentos que mais precisei. Foram uma ajuda imprescindível por todo o conhecimento que prontamente se prestaram a transmitir assim como a amizade que me fez sorrir inúmeras vezes.

Ao André Caldeira, Filipe Fonseca e Gonçalo Simões por estes magníficos cinco anos onde o companheirismo, ajuda, solidariedade, amizade e diversão foram uma constante. Sem eles, nada disto teria sido possível. Os próximos cinco anos serão ainda melhores!

Obrigado por tudo!

## Capítulo 1 - Introdução

O início do século XXI foi um ponto de viragem no setor energético. Este período fez-se marcar por um aumento do custo da energia a nível mundial o que conduziu a um aumento da preocupação relativamente à racionalização da energia e eficiência energética. No entanto, este comportamento foi uma vez mais alterado, quando em 2008, se fez sentir a grande crise económica e financeira em todo o globo alterando assim as prioridades e fazendo com que a diminuição dos custos de energia fossem uma prioridade, muitas vezes, em detrimento do conforto térmico.

O gasto associado com a manutenção do conforto térmico nos mais diversos edifícios é responsável por grandes consumos de energia [1] e de forma a diminuir esses mesmos gastos, tem-se verificado uma introdução gradual de sistemas de ventilação natural.

Esta ventilação natural acontece espontaneamente através dos quais o movimento do ar resulta da sua impulsão natural para manter o equilíbrio da temperatura e pressão entre o interior e o exterior. Este efeito é mais eficiente quanto maior for a diferença de temperaturas e pode depender do tipo de clima, do desenho do edifício e claro ser alterado através de comportamento humano. A sua importância divide-se com a necessidade de obtenção de boa qualidade de ar e também o conforto térmico.

As estratégias de ventilação natural são bastante diversificadas, contando entre elas com a *Single-Sided ventilation*, *Cross Ventilation*, *Stratum Ventilation*, *Displacement Ventilation*. Algumas destas estratégias de ventilação são já bastante antigas havendo registos de implementação desde o século XII.

Uma destas soluções de ventilação natural, *Displacement Ventilation*, irá ser utilizada ao longo deste trabalho como solução para um edifício na Universidade do Gana, mais propriamente para ser implementado nas salas de aula. Como mencionado anteriormente, a velocidade do vento junto dos edifícios é um aspeto importante a ter em conta e, de forma a conseguir ser analisada essa informação, foi necessário recorrer a uma ferramenta, *computer fluid dynamics* que permite simular estas mesmas velocidades. Esta simulação irá ser sucedida por uma outra simulação, desta vez térmica com a utilização do *Energy Plus*.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho foi realizado com o intuito de analisar e dimensionar o sistema de ventilação natural para um novo edifício na Universidade do Gana. O objetivo da simulação é analisar a temperatura interior das salas assim como a sua qualidade do ar. Desta forma, é necessário simular as condições no seu interior e propor novas configurações das salas de forma a minimizar o desconforto no seu interior.

Embora os sistemas de ventilação natural sejam controláveis, as condições que poderão, de alguma forma, promover este fenómeno são imprevisíveis o que poderá alterar a qualidade do ar no interior ou a sua temperatura. Visto que não estava disponível a possibilidade de utilização de sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) devido a constrangimentos económicos, a prioridade passa por arrefecer o interior das salas utilizando apenas a ventilação natural tentando manter a temperatura operativa dentro dos limites aceitáveis utilizando para isso um modelo adaptativo de temperaturas.

## 1.2 Questões de investigação

No seguimento dos objetivos traçados, foi necessário proceder à idealização de questões científicas que o estudo pretende responder. Com a resposta às seguintes perguntas será possível aferir o conforto ou desconforto dos alunos e professores durante o ano letivo nas salas de aula. Desta forma, foram formuladas as seguintes questões:

- De que forma se comporta o sistema de ventilação natural durante o ano?
- Quais as estratégias de ventilação natural a adotar?
- É ou não garantido o conforto no interior do edifício através de recurso exclusivo à ventilação natural para climatizar o espaço?
- Serão as propostas executáveis perante a economia do país?

## 1.3 Estrutura da tese

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos sendo que o primeiro capítulo abrange toda esta secção introdutória.

Ao longo do Capítulo 2 é realizada uma primeira abordagem a todos os conceitos teóricos imprescindíveis para a realização deste trabalho. Uma vez que o grande objetivo passava por simular as condições dinâmicas no interior de uma sala de aula foi necessário recorrer ao uso do programa *EnergyPlus* para obter esses mesmos dados.

É também abordada toda a parte teórica relativamente à radiação solar e transferências de calor nos materiais assim como o balanço térmico no edifício.

No Capítulo 3 é apresentado detalhadamente o caso de estudo e o enquadramento na respetiva universidade.

O Capítulo 4 são apresentados todos os modelos de estudo escolhidos no decorrer do projeto assim como as fundamentações de todas as escolhas tomadas ao longo do projeto.

No capítulo 5 são apresentados todos os resultados e a sua discussão.

O capítulo 6 está reservado para a apresentação das conclusões que foram retiradas e um possível desenvolvimento futuro do projeto.

## Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

### 2.1 Transferência de Calor

Para ser estudado e compreendido o comportamento térmico dos edifícios é necessário também perceber os mecanismos de transferência de calor.

As transferências de calor baseiam-se nos princípios da termodinâmica e ocorre sempre que existe uma diferença de temperatura entre dois elementos ou pontos de um determinado elemento. Esta transferência de energia ocorre sempre no sentido de o elemento com temperatura mais elevada para o elemento com a temperatura mais reduzida até atingir o equilíbrio térmico. Em todo este processo e de acordo com a primeira lei da termodinâmica, a energia cedida do elemento com maior temperatura será igual á energia recebida pelo elemento com menor temperatura [2].

Estas trocas de calor podem realizar-se através de três mecanismos diferentes: Condução, Convecção e Radiação (figura 1).

Relativamente ao processo de transferência de calor por radiação, este é designado de radiação térmica. Todas as superfícies emitem energia em forma de ondas eletromagnéticas. Quando estamos perante um gás entre duas superfícies, existe ainda a troca de calor por radiação entre as duas superfícies desde que estejam a diferentes temperaturas.

Quando há a existência de uma diferença de temperatura em meio estacionário como um sólido ou um líquido, é denominado de condução. O calor é transferido de um elemento para o outro através da agitação molecular e consequentes choques entre as moléculas. No entanto, o termo convecção está relacionado com a transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido quando a sua temperatura difere.

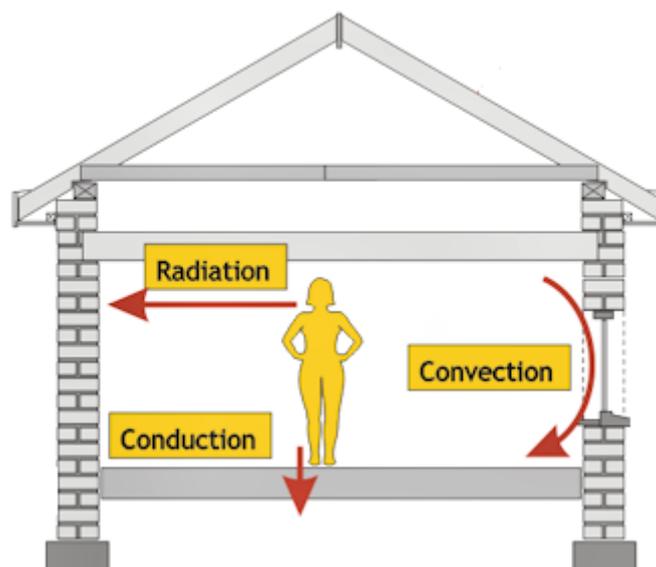


Figura 1: Mecanismos de transferência de calor por radiação, condução e convecção, adaptado. [3]

### 2.1.1 Radiação

Toda a matéria, independentemente do seu estado físico, que não se apresente a uma temperatura diferente do zero absoluto, ou seja, 0 Kelvin, emite energia sob a forma de radiação.

Como foi referido anteriormente, a radiação não necessita de um meio material para se propagar, havendo por isso propagação de radiação no vácuo. Esta emissão de radiação ocorre sempre que existem duas superfícies a diferentes temperaturas que devido à vibração das moléculas superficiais, é emitida energia radiante para o espaço até esta encontrar uma superfície que a irá absorver parte dessa energia e refletir a restante [4,5].

A transferência de calor por meio radiativo é descrita através da equação 1:

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{amb}) \quad (1)$$

Onde:

$q_{rad}$  – Fluxo de calor por radiação [W]

$h_r$  – Coeficiente de transferência de calor por radiação [W/m<sup>2</sup>]

$A$  – Área do corpo [m<sup>2</sup>]

$T_s$  – Temperatura da superfície do corpo [K]

$T_{amb}$  – Temperatura ambiente [K]

### 2.1.2 Condução

A Lei de Fourier (equação 2) descreve o fluxo de calor transmitido, unidireccionalmente, por unidade de área através do método de condução da seguinte forma:

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Onde:

$q''_x$  – Fluxo de calor por condução [W/m<sup>2</sup>]

$k$  – Condutividade térmica do material [W/m.K]

$\frac{dT}{dx}$  – Gradiente de temperatura [K/m]

Na equação, o sinal negativo indica o sentido do fluxo de calor, sendo este positivo quando efetuado no sentido do meio com temperatura mais baixa como se pode verificar através da figura 2.

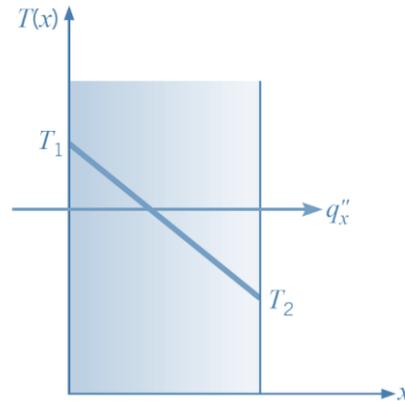


Figura 2: Sentido do fluxo de calor para um gradiente de temperatura unidirecional [8]

No entanto a transferência de calor difere consoante o estado físico das partículas.

Nos sólidos, esta transferência de calor varia consoante a característica química do mesmo. No caso deste ser condutor de eletricidade, a condução dá-se seguindo os princípios da condução elétrica, ou seja, através da movimentação dos eletrões livres. Relativamente aos sólidos não condutores, esta transferência ocorre devido a oscilações longitudinais da sua estrutura.

Nos gases, uma vez que estes apresentam um movimento molecular muito aleatório, a condução térmica ocorre ao nível de movimentos de translação, vibração e rotação das moléculas transmitindo-se através das colisões moleculares [6,7].

Relativamente à transferência de calor nos líquidos, estes apresentam uma estrutura molecular mais coesa em comparação com os gases, o que por sua vez, proporciona uma interação molecular mais frequente levando a uma oscilação longitudinal da sua estrutura.

### 2.1.3 Convecção

Este mecanismo de transferência de calor ocorre perante o contacto entre um sólido e um fluido adjacente. Esta transferência de calor pode ser obtida através da Lei de Newton (equação 3) do arrefecimento e é proporcional à velocidade do fluxo desse fluido, ou seja, é maior quanto maior for a sua velocidade.

$$q_{conv} = A \cdot h_c \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Onde:

$q_{conv}$  – É o calor transmitido por convecção [W]

$A$  – Área normal ao fluxo [m<sup>2</sup>]

$h_c$  – Coeficiente de transferência de calor por convecção [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>]

$T_s$  – Temperatura da superfície [K]

$T_\infty$  - Temperatura do fluido a uma distância que não sofra efeito da superfície [K]

Relativamente ao movimento do fluido, o escoamento pode classificar-se como laminar ou turbulento. No regime laminar predominam as forças de atrito que originam velocidades baixas. O regime turbulento é característico por ter velocidades elevadas devido à presença de obstáculos ou por variações na geometria do escoamento o que conduz à ocorrência de vórtices [8,9].

Existem ainda dois tipos de convecção distintas; Convecção natural e convecção forçada. Como o nome sugere, na convecção forçada o fluxo produzido resulta de fontes externas como ventiladores; na convecção natural, esta é gerada devido à não homogeneidade da densidade devido a diferenças de temperatura.

## 2.2 Balanço de Energia em Edifícios

As decisões relativamente à engenharia de um edifício tomadas na fase de projeto podem ser de extrema importância na qualidade térmica desse mesmo edifício e poderá significar uma grande poupança de energia anual. A qualidade térmica do edifício depende de vários fatores como o clima local, a exposição solar ou a taxa de ocupação, entre outros, e que resultam da análise do balanço energético descrito na equação 4.

A equação seguinte permite então traduzir o estudo da influência da combinação desses processos, ao descrever o balanço térmico de um edifício:

$$G_i + G_s + G_v + G_c = \rho \cdot C_p \cdot V_s \frac{dT}{dt} + \sum_{n=1}^k (T_i - T_e) \cdot A_n \cdot U_n \quad (4)$$

Onde:

$G_i$  – Ganhos internos [W];

$G_s$  – Ganhos solares [W];

$G_v$  – Ganhos devido a ventilação [W];

$G_c$  – Carga de climatização [W];

$\rho \cdot C_p \cdot V_s \frac{dT}{dt}$  – Ganhos devido à energia armazenada do próprio ar interior [W];

$\sum_{n=1}^k (T_i - T_e) \cdot A_n \cdot U_n$  – Perdas pela envolvente [W];

$\rho$  – Densidade do fluido [kg/m<sup>3</sup>];

$C_p$  – Calor específico [J/kg.K];

$V_s$  – Volume do fluido [m<sup>3</sup>];

$\frac{dT}{dt}$  – Variação da temperatura interior para um intervalo de tempo [K/s];

$A_n$  – Área da superfície n [m<sup>2</sup>];

$U_n$  – Coeficiente de transmissão térmica da superfície n [W/m.K];

$T_i$  – Temperatura interior [K];

$T_e$  – Temperatura da superfície n [K].

Uma vez que grande parte das variáveis tidas em conta no cálculo do balanço energético possuem um comportamento dinâmico, como por exemplo o horário de ocupação, a temperatura ou a posição solar, torna-se imprescindível a utilização a um modelo computacional numérico. Esta simulação é realizada normalmente em intervalos de 60 minutos com recurso a dados de clima de um ano típico no local em estudo e permite simular a envolvente do edifício, assim como variações de ocupação, sistemas de ventilação natural ou sistemas de AVAC.

Desta forma, as diversas simulações realizadas no decorrer deste trabalho foram feitas com o recurso ao *EnergyPlus 8.3.0*

## 2.3 EnergyPlus

Como já foi referido anteriormente, a ferramenta de simulação utilizada neste projeto foi o *EnergyPlus 8.3.0*. Este software permite uma simulação integrada e simultânea de vários parâmetros. É possível realizar uma simulação energética de um edifício que poderá ser utilizada por investigadores, arquitetos ou engenheiros de forma a modelar o consumo energético de um edifício.

O *EnergyPlus* é uma ferramenta com o conceito *open source*. Este conceito possibilita e promove o desenvolvimento do *software* e novas interfaces, por parte de programadores, com o intuito de facilitar a introdução e manipulação dos dados assim como um melhoramento progressivo dessa mesma ferramenta sendo esta sujeita a *updates* constantes por parte de programadores a nível mundial.

O *software* começou a ser desenvolvido em 1995 pelo DOE e resulta da integração de dois softwares distintos, o BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) do Departamento da Defesa dos E.U.A. e o DOE-2 do Departamento de Energia dos E.U.A. Desde essa data têm sido muitas as alterações e funcionalidades que foram alteradas em relação aos programas iniciais que eram baseados em *Fortran 90*. Presentemente, a estrutura permite uma melhor compreensão do código e das suas funcionalidades assim como uma melhor interação entre outros programas informáticos como por exemplo o *Sketchup* ou outro *software* de *Computer-Aided Design* (CAD).

Uma vez que o *EnergyPlus* apresenta um aspeto pouco interativo, é usual o utilizador optar pela utilização de uma interface gráfica que facilita a introdução de dados e auxilia o seu funcionamento. Para isso foi criado um *plug-in* do *EnergyPlus* no *software* do *Sketchup* 8 que compila num ficheiro de *Input Data File* (IDF) toda a informação gráfica criada no *Sketchup* que é depois importada para o *EnergyPlus*.

O *Sketchup* é também um *software open source* que viabiliza a criação da planta do edifício em três dimensões de uma maneira bastante mais rápida e fiável. Depois de o modelo estar finalizado, é necessário recorrer ao *Plug-in Legacy OpenStudio*, também desenvolvido pelo Departamento de Energia dos E.U.A. e todas as informações físicas do edifício são transferidas para o *EnergyPlus*. Desta forma o *EnergyPlus* consegue definir todas as coordenadas dos vértices de cada superfície do edifício. De seguida são introduzidas as propriedades dos materiais que o constituem e os parâmetros que caracterizam o ambiente interior e exterior do edifício como por exemplo o as infiltrações de ar, o horário de ocupação, sombreamento entre outros.

O *EnergyPlus* necessita também de um ficheiro de dados climáticos que é um arquivo com a extensão “.epw” com o nome de *Energy Plus Weather File*. Este arquivo traz consigo as informações anuais de uma série de dados meteorológicos para uma dada localização geográfica. Além disso, este *software* permite ainda que a simulação seja efetuada em regime livre ou em controlo de temperatura, o que permite o cálculo das necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento. É uma ferramenta também bastante útil em simulações de ventilação natural que recorrem a estratégias de *single-side ventilation* [10,11,12].

No entanto, este *software* apresenta também algumas simplificações que o afastam ligeiramente da realidade.

- Trocas de calor homogéneas entre o ar e as superfícies do edifício;
- Condução de calor unidirecional;
- Igual emissividade das superfícies para todos os comprimentos de onda;
- Todas as superfícies opacas excetuando os materiais das janelas;
- Distribuição homogénea da temperatura de cada superfície;
- Massa de ar de cada zona apresenta-se a temperatura uniforme e bem misturada.

De seguida, apresenta-se a equação 5 da forma como o *EnergyPlus* efetua o balanço térmico para cada *timestep* para uma determinada zona *z*.

$$C_z \frac{dT_s}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{si} - T_z) + \dot{Q}_{sis} + \dot{m}_{sis} C_p (T_{sis} - T_z) \quad (5)$$

Onde,

$$C_z \frac{dT_s}{dt} - \text{Energia armazenada no ar [W]}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i - \text{Somatório dos ganhos convectivos interiores [W]}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) - \text{Transferencia convectiva de calor das superficies [W]}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{si} - T_z) - \text{Trocas de calor por mistura de ar entre zonas [W]}$$

$$\dot{Q}_{sis} = \dot{m}_{sis} C_p (T_{sis} - T_z) - \text{Carga térmica do sistema de AVAC introduzida na zona}$$

$$\dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_s) - \text{Trocas de calor por infiltração de ar exterior}$$

A figura 3 representa as etapas que estão associadas a simulações de edifícios com a ferramenta do *EnergyPlus*.

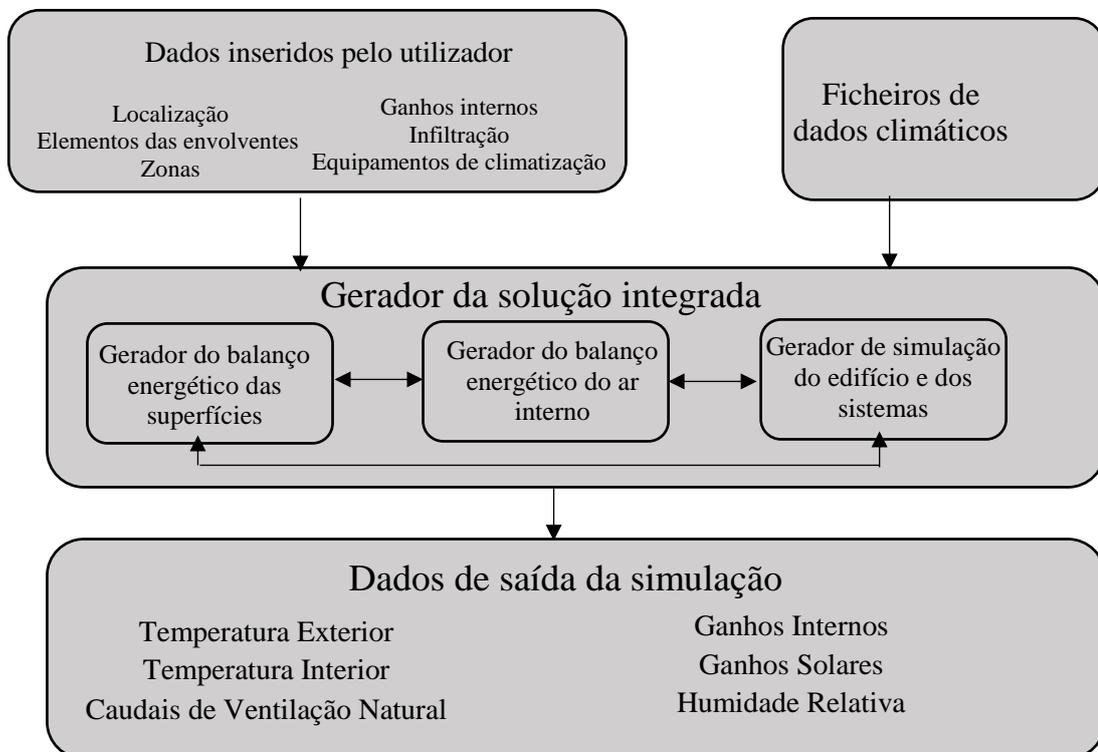


Figura 3: Etapas associadas à simulação de um modelo em *EnergyPlus* (Adaptado de Mateus, 2012) [13].

Como referido anteriormente, uma das grandes vantagens da utilização do *EnergyPlus* é o auxílio que oferece na fase de projeto de um edifício, no entanto, este não é o único. Somando à vantagem descrita anteriormente, podemos também aferir o auxílio na modelação dos fluxos de ventilação ou a avaliação do desempenho energético de um edifício na sua totalidade [14,15,16]. Este *software* permite também avaliar o cumprimento dos regulamentos energéticos em vigor, assim como avaliar os custos energéticos associados ao edifício e também os valores necessários para a implementação de medidas.

## 2.4 Conforto térmico

Conforto térmico é um conceito abstrato uma vez que não existem condições de conforto térmico exatas. O conforto térmico depende de vários fatores que podem ou não estar relacionados intrinsecamente com a pessoa [17]. Existem fatores objetivos como a atividade física ou o vestuário da pessoa, fatores térmicos como a temperatura do ar, temperatura média radiante a velocidade de deslocamento do ar ou fatores relacionados com a qualidade do ar como por exemplo o nível de CO<sub>2</sub> ou a humidade relativa [18]. Existem, no entanto, também fatores extremamente difíceis de quantificar como por exemplo os hábitos sociais ou fatores fisiológicos da pessoa o que torna o conforto térmico algo extremamente variável de pessoa para pessoa [19,20].

Embora exista a possibilidade de controlar os fatores ambientais através de sistemas de climatização e tratamento de ar, é complicado garantir o conforto devido a fenómenos como o gradiente vertical de temperatura ou a assimetria de radiação térmica.

Existem diversos modelos de conforto térmico que se baseiam na sensação de conforto ou desconforto sentida por ocupantes de um espaço em condições ambientais controladas, vestuário e níveis de atividade. Embora toda esta avaliação seja sempre demasiado subjetiva e varie perante imensas variáveis, existem parâmetros que claramente interferem com o conforto térmico dos ocupantes e é expectável que sejam respeitados alguns valores mínimos ou sejam mantidos dentro de intervalos desejáveis.

Um dos modelos mais conhecidos na caracterização do conforto térmico é o modelo de Fanger. Este modelo procede à quantificação de dois parâmetros distintos para a avaliação do conforto térmico, o PPD (*Percentage of People Dissatisfied*) e o PMV (*Predicted Mean Vote*).

Embora esse modelo esteja amplamente difundido, este não considera os efeitos da temperatura exterior onde existirá maior tolerância ao calor no Verão e ao frio no Inverno; o controle individual sobre o espaço de trabalho, visto que aumenta a tolerância. Em suma, este modelo não considera, portanto, os efeitos da adaptação [21].

No decorrer deste projeto foi utilizado o modelo de conforto adaptativo que se baseia na capacidade de adaptação às condições ambientais dos ocupantes de um determinado clima onde variam imenso as temperaturas médias exteriores como por exemplo no Gana, local do projeto [22].

Este tipo de modelos adaptativos é maioritariamente proposto para edifícios que não possuem na sua composição sistemas de climatização artificiais, mas em que existe a possibilidade de abrir janelas ou implementar outras propostas de ventilação natural. É maioritariamente utilizado em situações em que se demonstra existir uma maior tolerância dos ocupantes a temperaturas mais extremas como no projeto [23].

As tolerâncias de temperaturas podem ser apresentadas através das seguintes expressões e observadas na figura 4 [24]:

$$T_{conf_{min}} = T_{op} * 0.31 + 14.3 \quad (6)$$

$$T_{conf_{max}} = T_{op} * 0.31 + 21.3 \quad (7)$$

Onde

$T_{conf_{min}}$  – Temperatura mínima de conforto

$T_{conf_{max}}$  – Temperatura máxima de conforto

$T_{op}$  – Temperatura operativa exterior

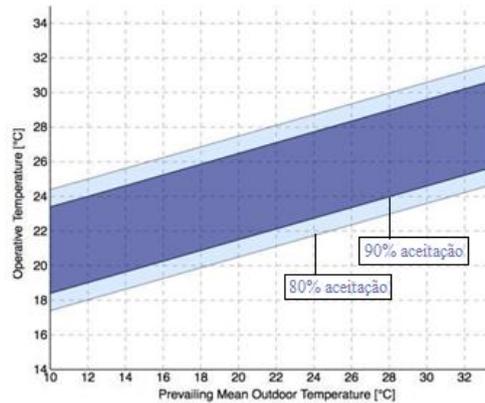


Figura 4: Intervalo de temperatura de conforto

## 2.5 Displacement Ventilation

*Displacement Ventilation* (DV) é uma estratégia de distribuição de ar numa sala onde o ar do exterior é fornecido a uma velocidade baixa através de entradas localizadas perto do nível do chão e onde esse mesmo ar é extraído normalmente à altura do teto do edifício [25].

No entanto, para compreender melhor as vantagens e limitações desta estratégia, é necessário compreender as diferenças entre uma distribuição de ar misturada e uma distribuição de ar totalmente estratificada.

Estratégias em que é utilizada uma distribuição de ar misturado, este é distribuído a velocidades relativamente altas através de difusores tipicamente instalados na parte superior dos edifícios. Quando os difusores estão instalados e colocados em posições corretas, isto não se traduz em desconforto para os ocupantes, uma vez que, o ar é inserido em zonas não ocupadas movendo-se gradualmente até zonas ocupadas como podemos ver na figura 5.



Figura 5: Sistema de ventilação utilizado em distribuição de ar misturado

O objetivo desta estratégia é que este ar inserido a uma velocidade de ar elevada consiga criar uma velocidade de ar em toda a sala consideravelmente mais baixa através de arrastamento. Idealmente, este arrastamento de ar irá criar uma mistura de ar uniforme, resultando daí uma temperatura de ar constante.

Em distribuições de ar perfeitamente estratificados, ar do exterior, habitualmente mais frio, entra em zonas inferiores do edifício. Uma vez que este ar está mais frio que o ar no interior, esta baixa e fica distribuído lentamente ao longo da sala. Quando a massa de ar encontra uma fonte de calor, esta sobe e leva com ela o calor e poluentes em direção à parte superior do edifício. Uma camada de ar quente forma-se acima da zona ocupada devido à flutuabilidade natural do ar. Esta camada de ar mais quente acaba depois por sair através de grelhas localizadas na parte superior da sala. A figura 6 demonstra o funcionamento deste tipo de estratégia

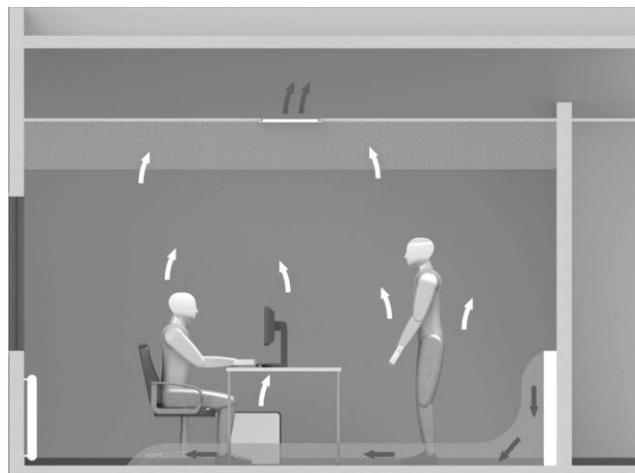


Figura 6: Sistema de ventilação utilizado em distribuição de ar estratificado

No entanto, esta estratégia enfrenta algumas condicionantes e apenas a correta implementação deste sistema conseguirá manter o conforto dos ocupantes. Em alguns casos existe a possibilidade da ocorrência de ar a temperaturas demasiado baixas causando desconforto ao nível das extremidades dos ocupantes; outro fator a ter em conta é a estratificação do ar que poderá levar à ocorrência de grandes gradientes de temperatura verticais [26].

O controlo da humidade relativa é também uma preocupação neste tipo de solução. Consequentemente, em determinados climas, edifícios que recorram à estratégia de *Displacement Ventilation* requer o uso de um bom envelope do edifício e o tratamento separado do ar exterior para um melhor controlo dos níveis de humidade do ar [27].

## Capítulo 3 - Caso de estudo

### 3.1 Definição e Localização

O edifício em estudo irá ser construído em Acra, Gana. Será um edifício de salas de aula, auditórios e salas para o corpo docente. Estas últimas irão receber soluções de AVAC e não foi necessário proceder à sua simulação dinâmica, pelo que, apenas foi necessário estudar salas de aula pequenas, salas de aula médias e os auditórios para as diferentes fachadas do edifício.



Figura 7: Imagem aérea de enquadramento da zona de estudo

O Gana está situado na África Ocidental estando limitado a sul pelo Oceano Atlântico. Uma vez que este país se situa apenas alguns graus acima da linha do equador, o seu clima é bastante húmido e quente. Existe no país duas estações chuvosas, entre Maio e Junho e posteriormente em Agosto e Setembro.

Sendo o Gana um país equatorial as horas de exposição solar permanecem praticamente uniformes durante todo o ano. A humidade relativa desta cidade é também bastante elevada, sendo em média 65% ao longo da tarde e subindo para 95% em períodos noturnos. A direção predominante do vento na capital é de Sudoeste com ventos a variar, em média, entre os 8km/h e os 16km/h.

Dada a elevada exposição solar, aliada a uma elevada humidade relativa, é dado aos sistemas de ventilação natural, como o que queremos implementar no edifício, um enorme desafio para que os ocupantes se sintam confortáveis dentro do edifício.

Uma vez que as condições económicas não permitem a implementação de sistemas AVAC em todas as salas e auditórios, o sistema de ventilação natural é a única solução disponível para implementar. É de ressaltar que dadas as condições climáticas acima descritas, dificilmente será possível satisfazer todos os requisitos mínimos de conforto dos ocupantes.



Figura 8: Modelo da fachada da Universidade

### 3.2 Ocupação

Para ser possível simular corretamente um edifício através do *EnergyPlus*, existem diversas variáveis que são necessárias de definir *a priori*.

Sendo as simulações incidem especialmente em salas de aula, foi necessário proceder à idealização de um calendário de ocupação dessas mesmas salas.

O calendário escolar distingue dois períodos distintos anualmente. Na tabela 1 está representado o calendário escolar do ano 2015/2016 em que nos baseámos para a configuração do calendário de ocupação.

Tabela 1: Calendário escolar da Universidade do Gana para o ano 2015/2016

	1º Semestre	2º Semestre
Início	17/08/2015	01/02/2016
Final	18/12/2015	29/04/2016
Início de exames	19/12/2015	30/04/2016
Final de exames	17/01/2016	28/05/2016

Em adição, foi necessário ter uma noção do calendário diário de utilização médio das salas de aula. Na tabela 2 está o período de aulas normal referente a um dia letivo.

Tabela 2: Horário de ocupação de uma sala para dia de aulas

Início de Aulas	07:30h
Final de Aulas	19:30
Intervalos	10 min
Duração Média	2/3h

Para finalizar, foi suposta uma ocupação média de 20 alunos por sala. Sendo que cada um possui uma unidade de taxa de metabolismo [met] igual a  $58.15 \text{ W/m}^2$  e uma área corporal de  $1.81 \text{ m}^2$  (para um ocupante adulto com 70 kg e 1.70m de altura), é possível obter um valor de 120 W por pessoa [28].

Em adição aos ganhos internos vindos da ocupação, foi também adicionado um valor de  $10 \text{ W/m}^2$  para a iluminação [29].

### 3.3 Ficheiro climático

O *software EnergyPlus* necessita de um ficheiro climático da localização em estudo que tem como base os dados meteorológicos horários para um ano típico em Acra.

Este tipo de ficheiro é designado por ficheiro EPW (*EnergyPlus Weather*) é possível ser obtido através do website da *EnergyPlus*.

Através deste ficheiro é possível conseguir os dados necessários para a correta simulação como por exemplo a humidade relativa, radiação difusa horizontal e radiação direta normal, velocidade e direção do vento assim como temperaturas exteriores, temperaturas de bolbo seco entre outras.

Uma vez que o clima é bastante distinto do clima em Portugal, foi necessário começar por realizar uma análise profunda ao clima.

Nos gráficos seguintes estão mostradas as principais variáveis para este caso de estudo.

Começando pela temperatura média anual, o maior desafio para o conforto térmico em países equatoriais, é possível verificar uma elevada percentagem de horas com temperaturas superiores a  $28^\circ\text{C}$  como se pode ver no gráfico 1.

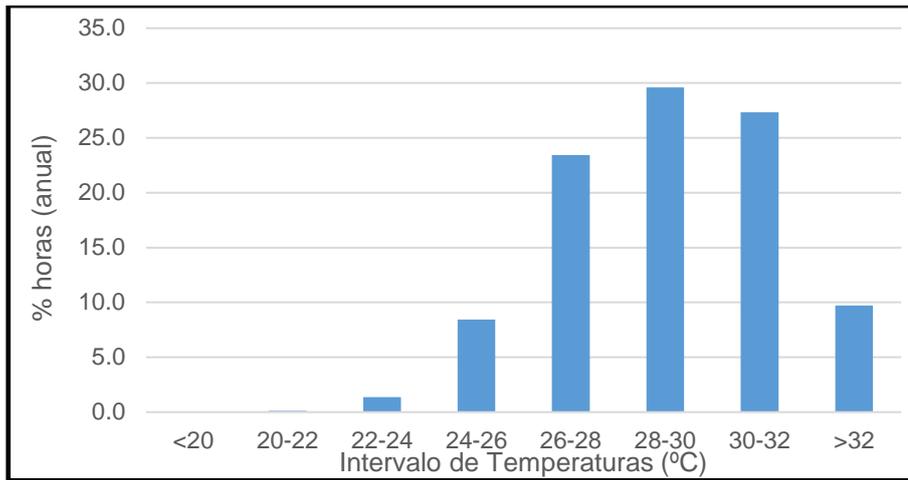


Gráfico 1: Percentagem de horas anuais de intervalos de temperatura

Como explicado anteriormente, foi utilizado o modelo adaptativo para prever as temperaturas máximas e mínimas de conforto de um ocupante no edifício.

Dessa forma, depois de retirar a temperatura horária anual exterior, é possível aferir a variação de temperaturas que serão possíveis os alunos suportar como podemos ver no gráfico 2.

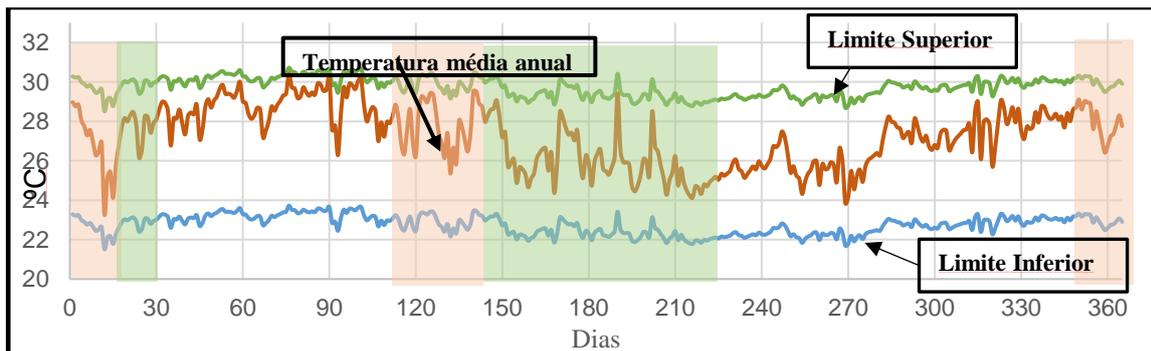


Gráfico 2: Temperaturas médias anuais e respetivos limites para o modelo adaptativo

Como é possível verificar, nesta localização e através do modelo adaptativo, é possível encontrar temperaturas máximas de conforto dos ocupantes que rondam os 30°C durante todo o ano.

No gráfico estão representados também os períodos letivos dos alunos, sendo que, o fundo de cor avermelhada representa a época de exames, o fundo verde representa as pausas letivas e finalmente o fundo branco está a representar o período normal de aulas.

### 3.3.1 Radiação Solar

Na superfície terrestre, a energia solar que incide na superfície terrestre resulta da soma de três tipos de radiação, a radiação solar direta e a radiação solar difusa (toda a radiação que é difundida em todas as direções pelas moléculas que estão contidas na atmosfera) e também a radiação que é refletida pelas superfícies como o solo e vegetação. A radiação solar total é, portanto, a soma de todos estes tipos de radiação previamente descritos.

Quando está céu limpo, a radiação incidente na superfície terrestre é de aproximadamente 50% da radiação que foi emitida pelo sol [30]. Estes casos acontecem quando a radiação difusa é bastante

baixa. No entanto, quando o céu está nublado, a percentagem de radiação difusa que incide na superfície terrestre pode variar entre 10% até mesmo aos 100% [31].

Segundo a Lei de Stefan-Boltzmann, a energia proveniente da superfície solar é conservada através do espaço e, portanto, é possível determinar a energia que atinge a parte superior da atmosfera terrestre.

$$P_{solar} = \sigma T^4 \left( \frac{R_s}{d_{ts}} \right)^2 \quad (8)$$

Onde,

$\sigma$  – (5.67 x 10<sup>-8</sup> W.K<sup>-4</sup>.m<sup>-2</sup>) (Constante de Stefan-Boltzmann)

T – Temperatura média da superfície solar [K]

$R_s$  – Raio solar equatorial [m]

$d_{ts}$  – Distância média entre a terra e o sol [m]

Resolvendo a equação acima, podemos chegar a um valor aproximado de 1360 W.m<sup>-2</sup>. Esta, no entanto, não é a irradiância que chega à superfície terrestre devido a efeitos como a dispersão, reflexão ou absorção que existem na atmosfera. A absorção é responsável por uma diminuição de aproximadamente 360 W.m<sup>-2</sup> mesmo em dias de céu limpo, ou seja, a radiação passa a apenas aproximadamente 1000 W.m<sup>-2</sup> quando incide na superfície terrestre [32]

Este tipo de energia tem, portanto, uma grande influência no comportamento térmico dos edifícios. Relativamente a transferências de calor, as variáveis que mais influenciam um edifício são a temperatura do ar exterior e a radiação solar [33].

Em países em que as necessidades de climatização se concentram maioritariamente no arrefecimento, como é o caso de estudo, estas variáveis têm um papel determinantes no conforto térmico no interior dos edifícios. Estes factos fazem com que seja necessário reduzir essas necessidades e para isso é importante adotar algumas estratégias como a utilização de proteções solares nas janelas exteriores, uma ventilação adequada, adotar edifícios com grande inércia térmica e proceder a arrefecimento noturno entre outras. Algumas destas soluções podem apenas ser implementadas durante a fase de projeto do edifício, mas há também soluções que podem ser adicionadas a um edifício já construído.

Depois de analisado este recurso, foi necessário proceder ao estudo da radiação solar no Gana.

Foi necessário proceder a uma simulação de forma a saber o tipo de radiação solar mais incidente na localização da Universidade.

No gráfico 3 podemos observar o tipo de radiação médio anual presente em Acra.

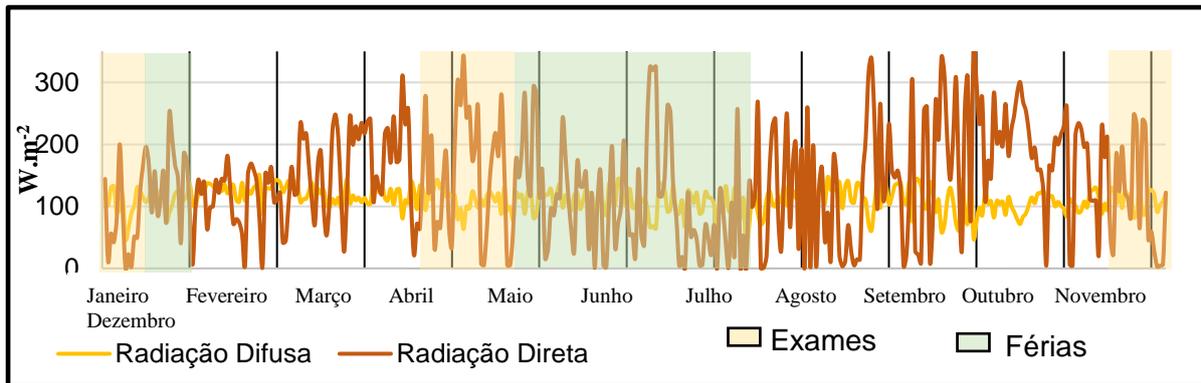


Gráfico 3: Radiação média anual incidente na cidade de Acra.

### 3.3.2 Humidade relativa

De acordo com o ASHRAE Standard 62.1-2013, em concordância com o ASHRAE BOD *approved adenda*, a humidade relativa dentro de um edifício terá de ser no máximo de 65%, sendo que em edifícios localizados em zonas equatoriais, um ocupante poderá estar em conforto com humidades de aproximadamente 70% [34]. Como se pode verificar através do gráfico 4, a humidade relativa na zona do edifício encontra-se maioritariamente com valores acima de 70% de humidade.

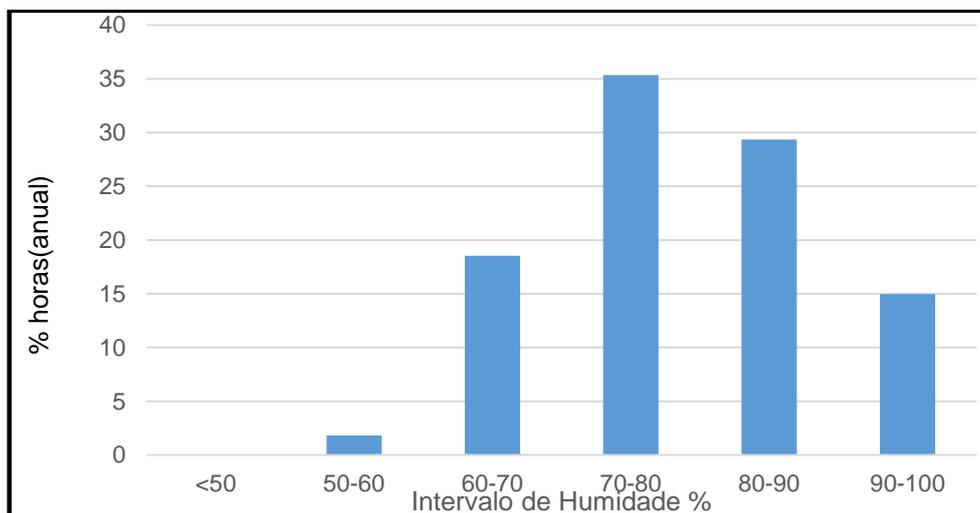


Gráfico 4: Percentagem de horas anual de valores de humidade relativa

### 3.3.3 Ventilação

Finalmente orientação e velocidade do vento foram também analisados. Uma vez que os ocupantes de edifícios naturalmente ventilados aceitam maiores gamas de temperatura [35,36,37], uma simples variação de 0.1m/s em velocidades de vento dentro de um edifício afeta significativamente a sensação de conforto dos ocupantes [38].

No gráfico 5 podemos ver a direção predominante do vento, enquanto no gráfico 6 podemos analisar um perfil médio diário do vento incidente na zona

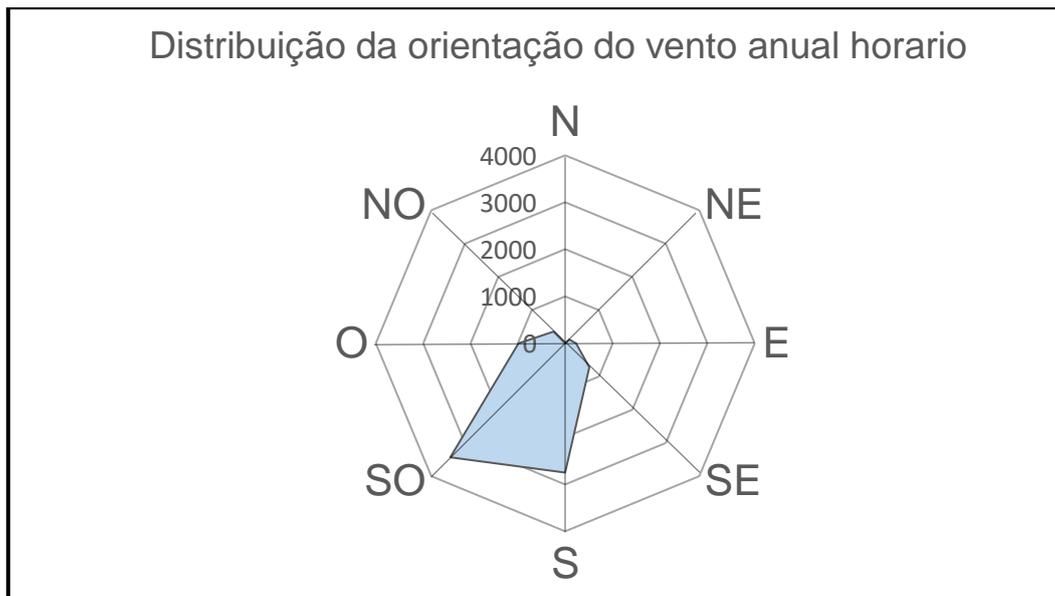


Gráfico 5: Distribuição horaria anual da orientação do vento

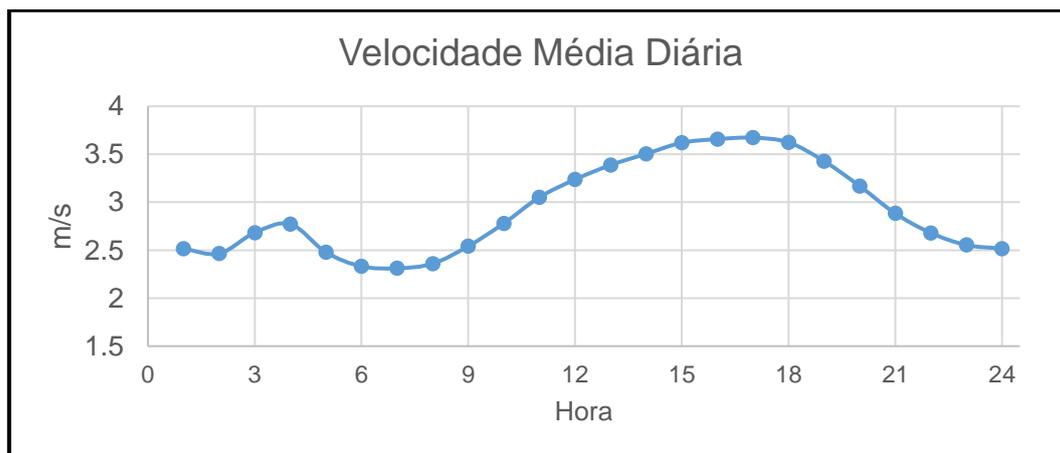


Gráfico 6: Perfil médio diário da velocidade do vento

Como é possível verificar através do gráfico 5, o vento vem maioritariamente de Sudoeste e Sul durante todo o ano com pouca incidência a Oeste e Sul. Relativamente às velocidades do vento, há uma subida, durante o período da tarde, em que os ventos podem chegar a valores superiores a 12.6 km/h em média.

## Capítulo 4 – Modelos de Estudo

### 4.1 Definição dos modelos

Na realização deste projeto foi necessário recorrer a dois *softwares*, ambos *opensource*, para conseguir modelar as salas de aula.

Através do *plug-in Legacy Open Studio* é possível incorporar a geometria pretendida, desenhando a sala no *Sketchup* e referenciar todos os materiais pretendidos na construção neste mesmo software.

Para o cálculo dos caudais de ventilação natural, é também necessário a utilização de outro *software*, o *PHOENICS* mas dada a sua complexidade e a urgência na realização do projeto, essas simulações foram realizadas em simultâneo por outra pessoa.

De modo a simplificar a simulação, não é necessário desenhar todo o complexo de salas requeridas para a simulação. Deste modo, as simulações do comportamento térmico das salas de aula foram transpostas para um modelo típico de duas salas com aproximadamente 189m<sup>2</sup>. Na figura 9 podemos observar as plantas do piso inferior e superior respetivamente sendo que as áreas a azul são as salas que eram necessárias simular. No piso inferior, as salas com orientação a Oeste, eram auditórios que também não foi necessário simular devido à introdução de sistemas de AVAC. O desenho era constituído por 3 zonas térmicas, sendo elas uma sala a nível térreo, uma segunda sala num segundo andar e finalmente uma zona que não será ocupada sendo esta a parte superior do edifício, o telhado. Ambas as salas de aula têm um pé-direito de 5 metros. Foi ainda representado o sombreamento, sendo que na sala de cima, este está representado através da continuação da cobertura, enquanto no primeiro andar, o sombreamento é dado através do corredor de acesso às salas do piso superior como se pode ver na figura 10.

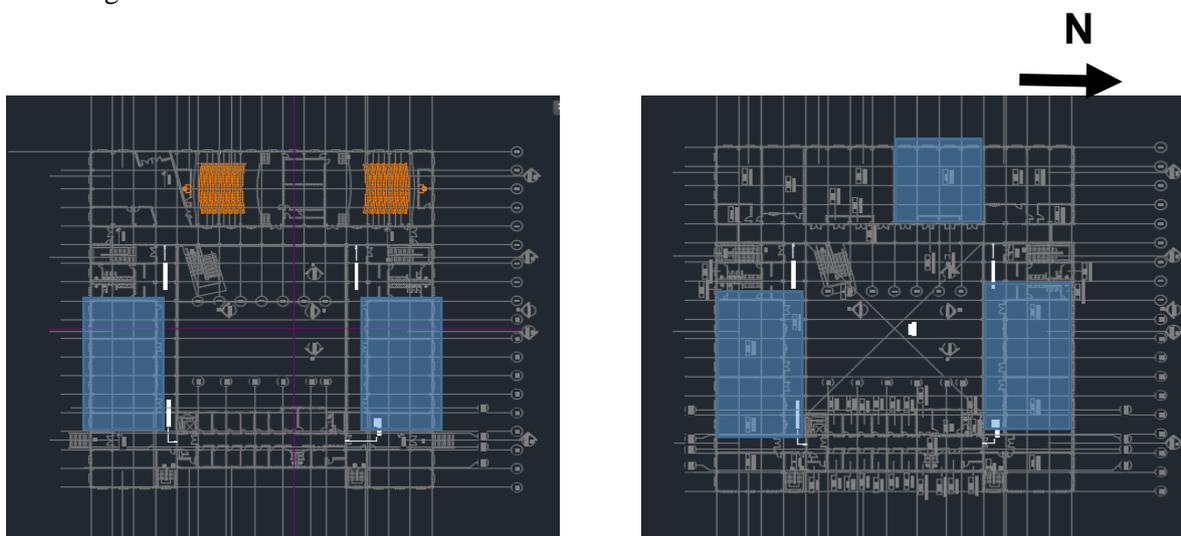


Figura 9: Planta do piso inferior e superior do edifício.

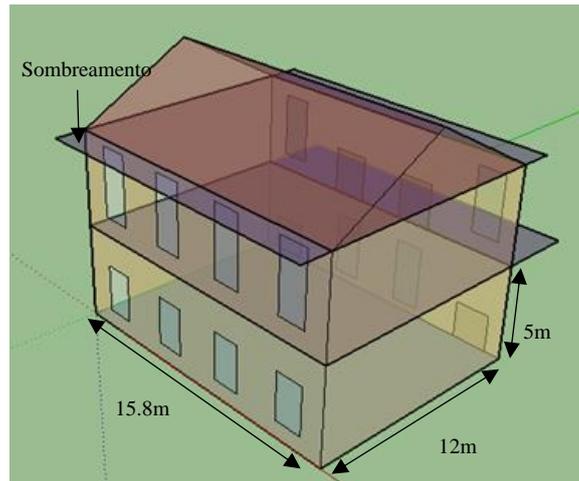


Figura 10: Modelo utilizado na simulação das salas de aula.

Neste edifício, apenas existem trocas de calor para o exterior nas salas de aula, em paredes que possuem janelas na fachada. Embora apenas seja simulada as duas salas de aula, de forma a corresponder à totalidade do edifício, as paredes laterais têm como condição fronteira o exterior da parede exatamente oposta. Desta forma, a parede Oeste está em contacto com a parede Este como podemos observar na figura 11. Nesta figura, as paredes a verde estão definidas como paredes interiores e as superfícies a azul estão em contacto com o exterior.

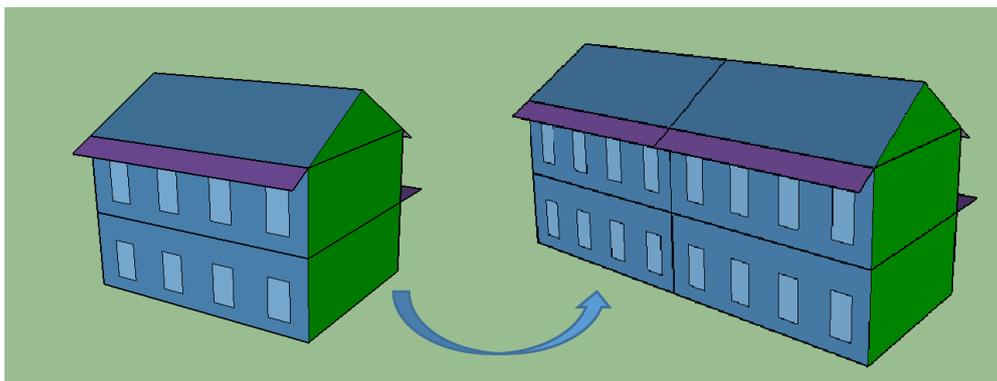


Figura 11: Zonas fronteira do edifício

Assim o modelo calcula as fronteiras como se estas fossem salas iguais. Esta condição foi utilizada também na parede da cobertura assim como nas paredes entre os pisos.

Dada a inexistência de legislação relativamente a conforto térmico no Gana, as exigências do projeto prendiam-se essencialmente com fatores monetários. Desta forma, foram apresentados diferentes modelos de forma a poder comparar com o edifício inicial sem qualquer solução de otimização.

No modelo 1, o desenho foi feito como estava previsto no projeto. Este não apresenta qualquer otimização a nível energético e grandes fachadas exteriores.

O modelo 2 foi introduzida uma solução de sombreamento exterior. Uma vez que o modelo 1 apresentava vãos envidraçados com uma grande área, esta foi a primeira proposta de alteração a realizar.

No modelo 3, comparativamente com o modelo 1 foram adicionadas chaminés para promover a circulação de ar no interior da sala através do efeito de *Stack Effect*. Foram introduzidas chaminés em ambos os pisos com saídas na cobertura.

Relativamente ao modelo 4, foram adicionadas ambas as soluções do modelo 2 e modelo 3 em conjunto.

Na tabela 3 estão apresentados os modelos simulados.

Tabela 3: Lista de modelos simulados e as respetivas alterações

Modelo	Descrição
1	Edifício Original
2	Adição de sombreamento nas janelas
3	Introdução de chaminés
4	Sombreamento exterior com chaminés

Os modelos foram definidos tendo em consideração as condições económicas do país, assim como as exigências relativamente às opções possíveis de tomar.

## 4.2 Simulações Dinâmica em EnergyPlus

Uma vez que o projeto está relacionado com uma universidade, foi utilizado um calendário escolar e partiu-se do princípio que a sala não estaria ocupada ou não valeria a pena simular fora dos períodos de aulas.

Assim, desta forma, irão ser apresentados juntamente com a descrição dos modelos as temperaturas simuladas durante o primeiro e segundo semestre do calendário escolar no Gana. É importante também referir que neste país, o 1º semestre corresponde aos meses de Inverno, enquanto o 2º semestre é referente aos meses de Verão. Nos gráficos estão também representadas o limite de temperatura que o individuo conseguiria suportar através do modelo adaptativo como explicado anteriormente.

Essa mesma temperatura irá ser comparada com a temperatura no interior do edifício e será obtida um número de horas em que os ocupantes irão sentir desconforto.

É também importante salientar que todas estas simulações tiveram de ser feitas para as três orientações das salas de aula, neste caso Norte, Sul e Oeste. A fachada orientada a Este era, pelo projeto, destinada a gabinetes de professores em que estes teriam já um sistema de AVAC logo não foi necessário proceder à simulação deste espaço.

O objetivo nestas simulações era, depois de definir soluções de climatização natural, observar o modelo em que seriam encontradas uma percentagem inferior de temperaturas acima da do limite superior, ou seja, o limite suportável para os ocupantes tendo em conta a temperatura exterior.

#### 4.2.1 Modelo 1

##### Edifício Original

Este modelo foi criado com base nas intenções dos arquitetos do projeto. Não tem qualquer tipo de solução energética associada e foi simulado através do *Energyplus* com intenção de poder ser feita uma comparação entre os vários modelos apresentados.

É, portanto, a solução inicial com os materiais construtivos que irão de servir de base para todas as outras simulações.

Na tabela 4 está descrita a constituição das superfícies do edifício.

Tabela 4: Características dos materiais de construção

Superfície	Material	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [Kg/m <sup>3</sup> ]	Calor Especifico [J/Kg.K]
Chão	Solo	1.7	1.14	1000	1200
	Enrocamento	0.25	1.2	1000	800
	Betão	0.1	2	2300	940
	Betonilha	0.05	1.35	1800	1000
Parede Exterior	Reboco	0.015	1.15	1950	653
	Tijolo	0.22	0.3793	633	920
	Reboco	0.015	1.15	1950	653
Parede Interior	Reboco	0.015	1.15	1950	653
	Tijolo	0.11	0.3793	630	920
	Reboco	0.015	1.15	1950	653
Teto	Reboco	0.015	1.15	1950	653
	Tijolo	0.11	0.3793	630	920
	Reboco	0.015	1.15	1950	653
Telhado	Telha cerâmica	0.007	1.15	1880	920

Como é possível perceber, os materiais escolhidos são bastante simples, não havendo qualquer tipo de isolamento ou sombreamento idealizado. Tudo isto tem como objetivo o baixo custo de construção do edifício.

Para este modelo foi também considerado, como pedido, um vidro simples para a construção dos vãos envidraçados.

Na tabela 5 estão descritas as especificações do mesmo

Tabela 5: Características dos vãos envidraçados

	Vidro Simples
Espessura [m]	0.006
Condutividade [W/m.K]	0.9
Transmissividade Solar	0.775
Refletividade Solar (frente)	0.071
Refletividade Solar (costas)	0.071
Transmissividade no visível	0.881
Refletividade no visível (frente)	0.08
Refletividade no visível (costas)	0.08
Transmissividade no infravermelho	0
Emissividade no infravermelho (frente)	0.84
Emissividade no infravermelho (costas)	0.84

Depois de desenhado o modelo com o auxílio do *Sketchup* é possível ter uma ideia de como foi idealizada uma sala deste edifício.

Na figura 12 podemos ver um modelo do edifício inicial.

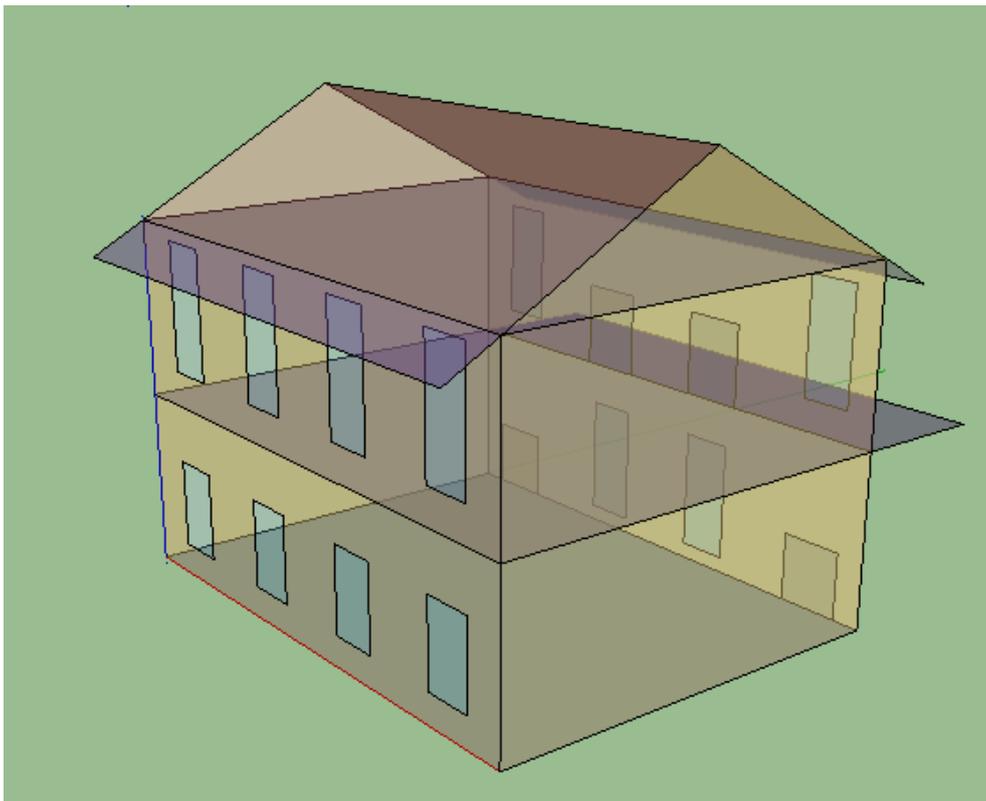


Figura 12: Modelo 1

Como podemos verificar, este modelo não dispõe de qualquer tipo de solução de climatização. Os únicos sombreamentos são apenas relativos ao avanço da cobertura e a um corredor que está localizado para o interior do espaço.

Com este tipo de construção, a única solução de climatização do espaço faz-se através de *Cross Ventilation*. Este tipo de ventilação ocorre sempre que há diferenças de pressão entre dois lados do edifício, no entanto, apenas uma fachada deste edifício está orientada a Sul, o que trará problemas nas restantes salas com orientações distintas.

Na figura 13 podemos ver este tipo de ventilação a ser utilizada no modelo 1.

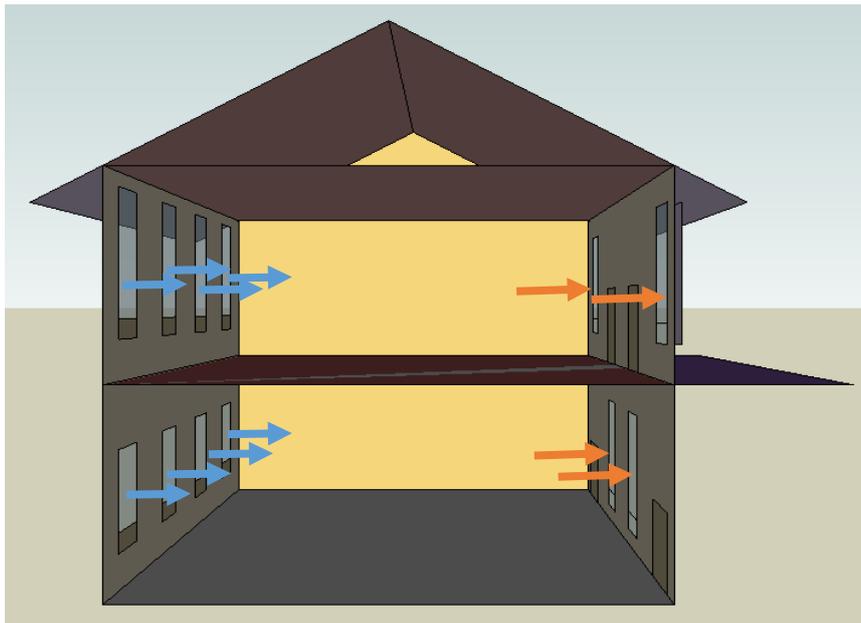


Figura 13: Esquema de ventilação utilizado no modelo 1

Assim, o ar do exterior, representado com as setas azuis, entra no edifício a uma temperatura inferior à temperatura no interior da sala e acaba por retirar da sala o ar mais quente. Este tipo de solução de ventilação natural é especialmente recomendado para edifícios que estejam sujeitos a ventos perpendiculares, com uma estrutura estreita e que estejam inseridos numa zona sem obstáculos para uma maior circulação do vento. Este modelo está apenas a utilizar o sistema de *Cross Ventilation* para o arrefecimento da sala. No decorrer da simulação, todas as janelas se encontravam abertas para promover uma maior circulação do ar.

#### 4.2.2 Modelo 2

##### Adição de sombreamento nas janelas

Este modelo, como foi descrito anteriormente foi idealizado apenas com a adição de sombreamento exterior.

Foi referido anteriormente que o Gana é um país com extrema exposição solar, temperaturas excessivamente elevadas e uma humidade relativa também bastante alta.

Dessa forma, e uma vez que o projeto apresenta uma grande área de vãos envidraçados, foi adicionado um modelo com sombreamento exterior para, dessa forma, ser possível comparar as temperaturas interiores com o modelo inicial.

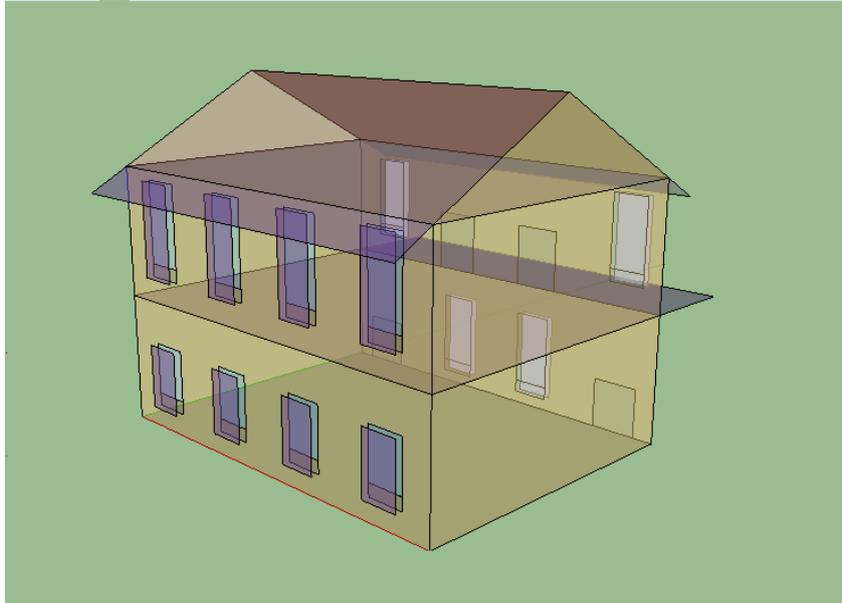


Figura 14: Modelo 2

Foi adicionado um parâmetro de transmissividade através da ferramenta *Schedule:Compact* no *EnergyPlus* para este tipo de sombreamento com um valor de 0.5 durante todo o ano.

Na figura 14 está representado o modelo em questão.

Para podermos verificar os resultados foram feitas novamente simulações para determinar o impacto que tem apenas a introdução de sombreamento exterior e desta forma poder comparar com o modelo inicial.

### 4.2.3 Modelo 3

#### Introdução de chaminés

De forma a conseguir controlar melhor as temperaturas no interior da sala, uma vez que as temperaturas são demasiado elevadas, foi necessário promover a deslocação de ar dentro do edifício.

Dessa forma, foi necessário recorrer a uma estratégia de ventilação natural utilizando chaminés.

Através deste modelo e com o auxílio do efeito de *stack effect*, é possível proceder ao arrefecimento da sala através do escoamento do ar aquecido no interior do edifício pelas chaminés.

Neste modelo, as chaminés irão ficar colocadas nas extremidades das salas de aula. Através do aquecimento do ar no interior da sala devido aos ganhos internos, este ar com uma temperatura superior tende a procurar as saídas localizadas na parte superior das salas. Esta diferença de pressão faz com que o ar do exterior seja trazido e como naturalmente este ar está a uma temperatura inferior, traz um arrefecimento aos ocupantes.

Na figura 15 está representado o modelo imaginado para esta solução.

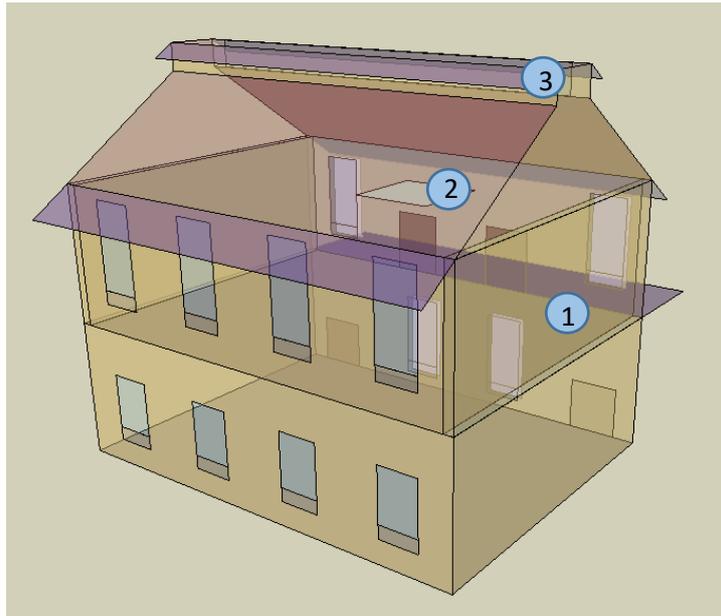


Figura 15: Modelo 3

É possível observar as chaminés no segundo andar definidas pelo número 1, chaminés que são utilizadas para escoar o ar vindo do piso inferior até à cobertura.

Relativamente ao escoamento do ar do piso superior, este procede-se apenas através de uma grelha na parte superior desse mesmo andar, identificado na figura 15 pelo número 2.

Todo este escoamento irá posteriormente ser agregado na zona do telhado onde será depois expelido para o exterior por aberturas na parte superior do telhado como podemos observar na figura 15, número 3.

Todas as janelas possuem aberturas distintas na sua parte inferior

Toda esta explicação pode ser observada através da figura 14 onde estão representados os fluxos de ar.

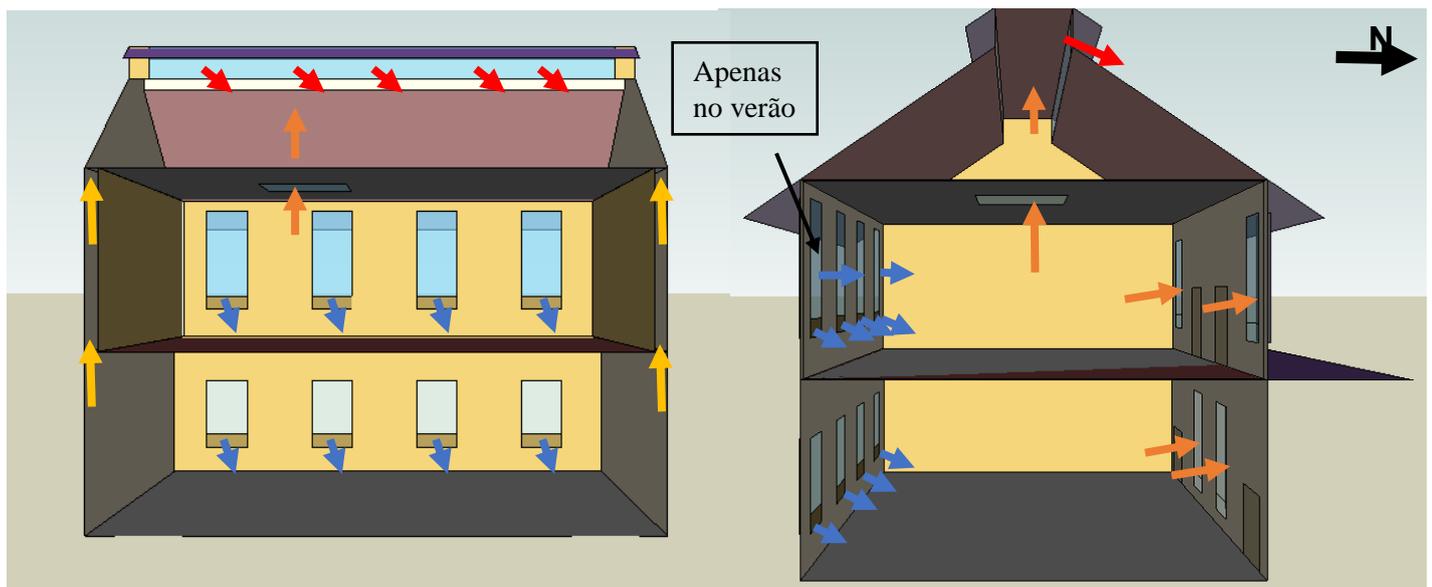


Figura 16: Esquema de ventilação utilizado no modelo 3

De forma a promover uma melhor circulação do ar dentro das salas de aula, foram idealizadas diversas aberturas na parte superior de cada sala. Como podem observar na figura 16, a sala inferior apresenta duas chaminés nas suas extremidades. Estas possuem uma abertura de  $3.9\text{m}^2$ , enquanto no piso superior, a abertura tem uma área de  $7.6\text{m}^2$ .

Estas medidas foram obtidas através da percentagem de área de pavimento. Foi determinado que iria ser utilizada uma percentagem de área de pavimento a rondar os 8% de forma a promover a fluibilidade do ar no interior de cada sala. Este valor é maioritariamente utilizado em Portugal, mas uma vez que não existem dados para temperaturas tropicais, foi optado por manter esta percentagem de abertura tendo também em conta os constrangimentos a nível de área que iria retirar ao espaço útil.

As janelas levaram também uma alteração onde se fez uma quebra na parte inferior de cada janela com uma área de  $0.7\text{m}^2$ . Assim, desta forma, durante um dia dito normal, seria apenas aberta a parte inferior das janelas viradas para o exterior do edifício enquanto as janelas viradas para o seu interior permaneciam totalmente abertas. Em dias excecionalmente quentes, toda a área das janelas iria ser aberta.

Na figura 17 podemos ver o modelo 3 juntamente com um esquema da área de abertura das janelas e chaminés utilizadas neste modelo

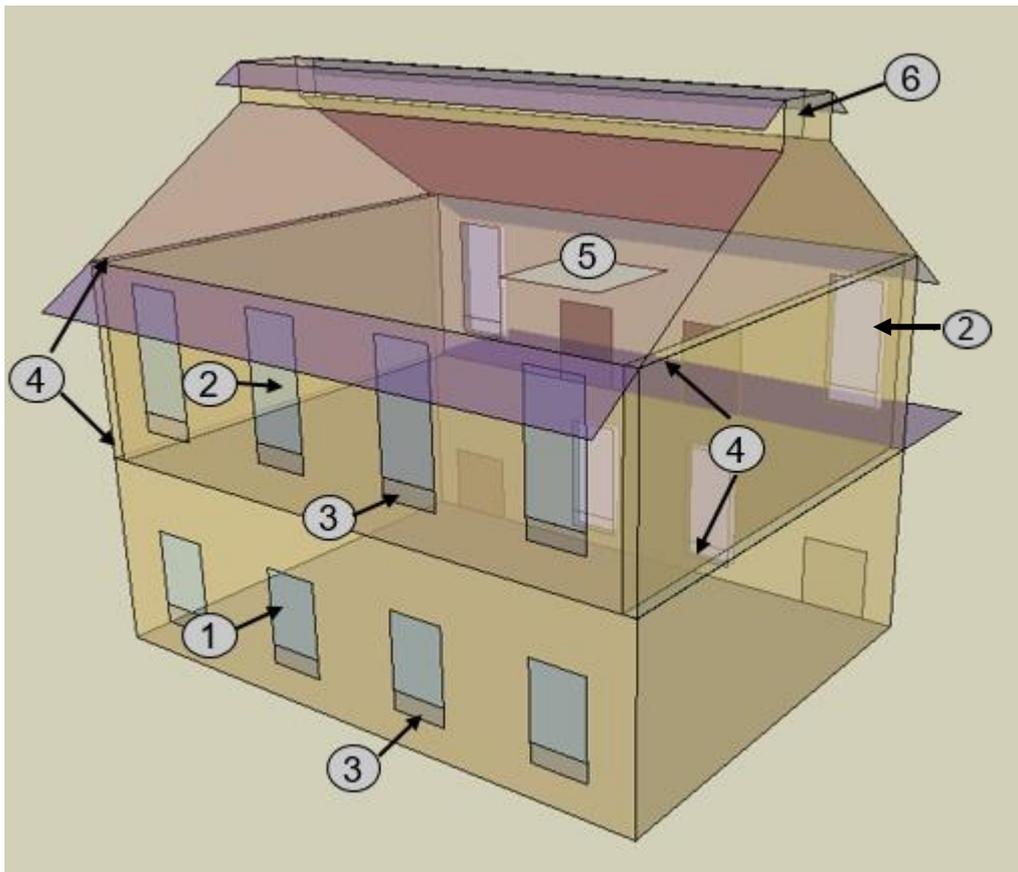


Figura 17: Esquema com áreas de abertura para o modelo 3

Na tabela 6 estão descritas todas as áreas de abertura e a sua relação com a área de pavimento das salas.

Tabela 6: Áreas de abertura do modelo 3

Abertura	% Área pavimento	Área (m <sup>2</sup> )
1	1.6	3.0
2	2.2	4.2
3	0.4	0.7
4	2.0	3.9
5	4.0	7.6
6	8.1	15.4

#### 4.2.4 Modelo 4

##### Sombreamento exterior com chaminés

Neste modelo foram apenas alienadas ambas as soluções anteriores do modelo 2 e do modelo 3.

Uma vez que ambas as soluções são relativamente fáceis de implementar, foi decidido adicionar um modelo com ambas as soluções de forma a comparar as simulações energéticas e ter uma ideia mais objetiva das temperaturas previstas depois de concluído o projeto.

Este cenário seria uma hipótese fazível dado o seu baixo investimento complementar e ser um cenário bastante promissor.

Na figura 18 podemos observar o modelo das salas de aula com ambas as soluções construtivas incorporadas

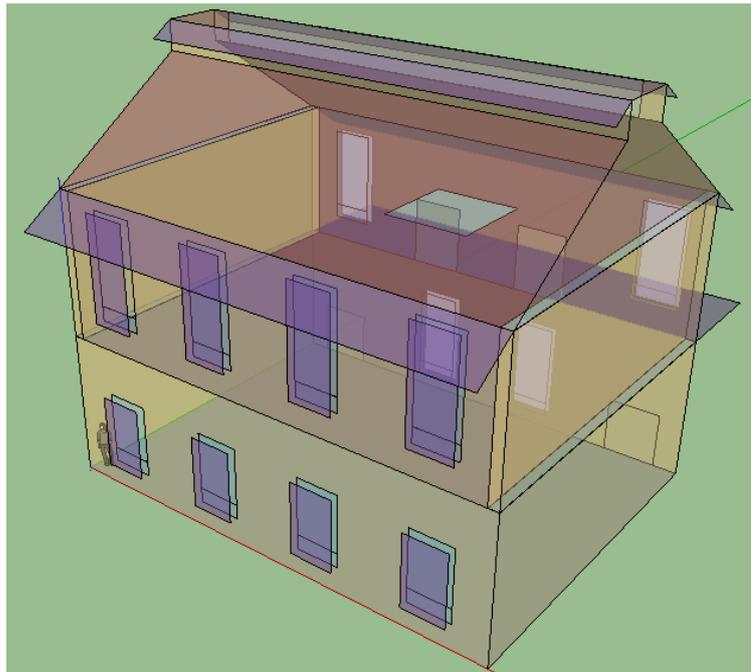


Figura 18: Modelo 4

Embora exista já um grande auxílio na climatização do interior das salas com o sistema de ventilação através do *Stack Effect*, a introdução de sombreamento exterior vai levar a que a temperatura no interior das salas seja dependente maioritariamente dos ganhos internos e da temperatura exterior.

## Capítulo 5 - Resultados

No seguimento de todas as simulações, de seguida estão apresentados todos os resultados para cada sala e cada orientação.

### Modelo 1

- Sul

Nos gráficos 7 e 8 podemos observar os resultados para a sala do piso superior com a fachada orientada a Sul.

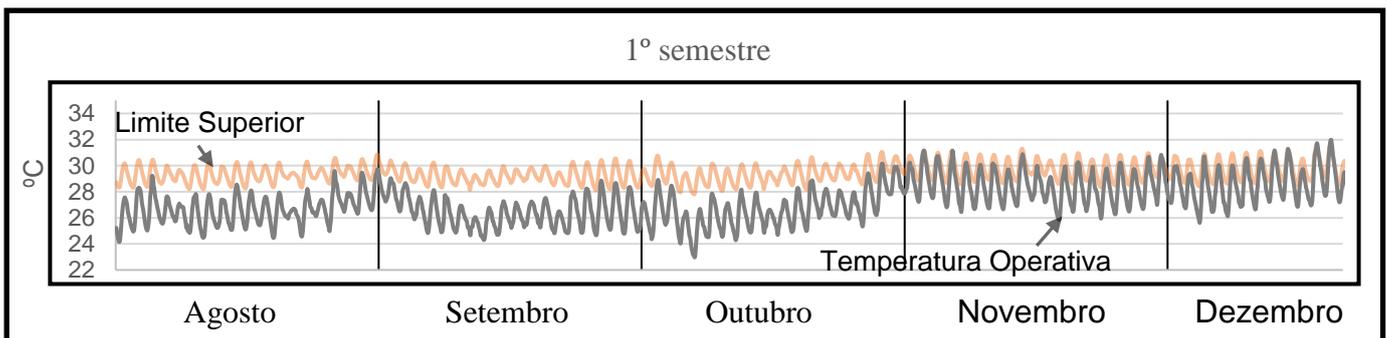


Gráfico 7: Temperaturas da fachada Sul para o piso superior, 1º semestre

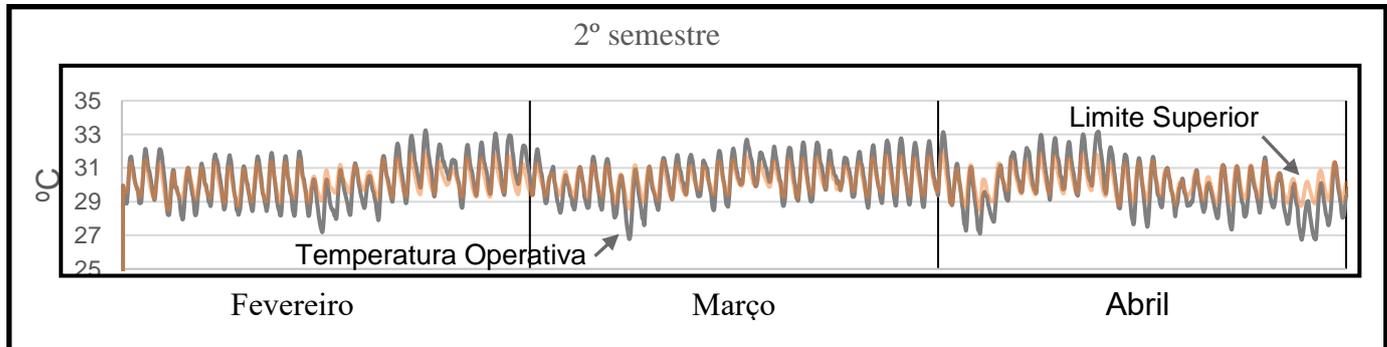


Gráfico 8: Temperaturas da fachada Sul para o piso superior, 2º semestre

Este cenário como podemos observar apresenta um numero de horas significativa acima do limite aceitável. Para ser exato, com esta configuração, os ocupantes da sala iriam estar em desconforto durante 40% das horas.

Relativamente à sala do piso inferior, os resultados estão apresentados nos gráficos 9 e 10.

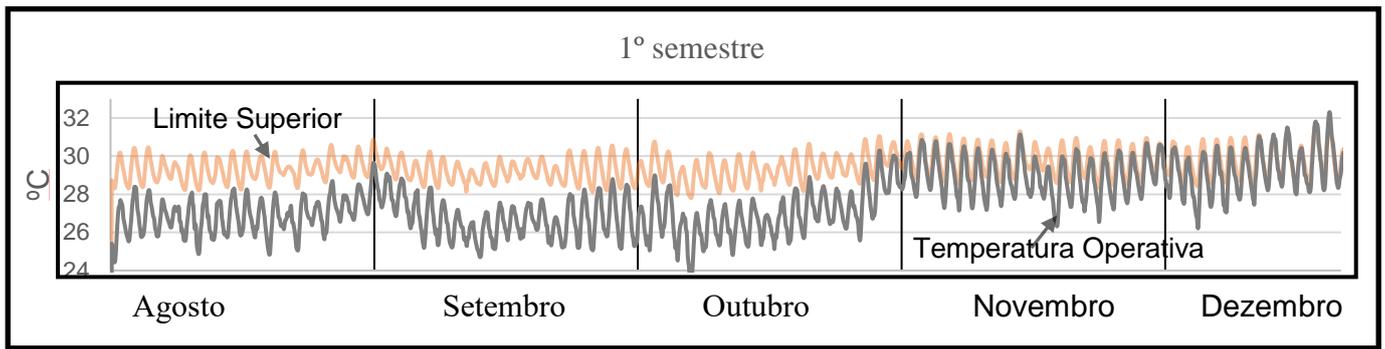


Gráfico 9: Temperaturas da fachada Sul para o piso inferior, 1º semestre

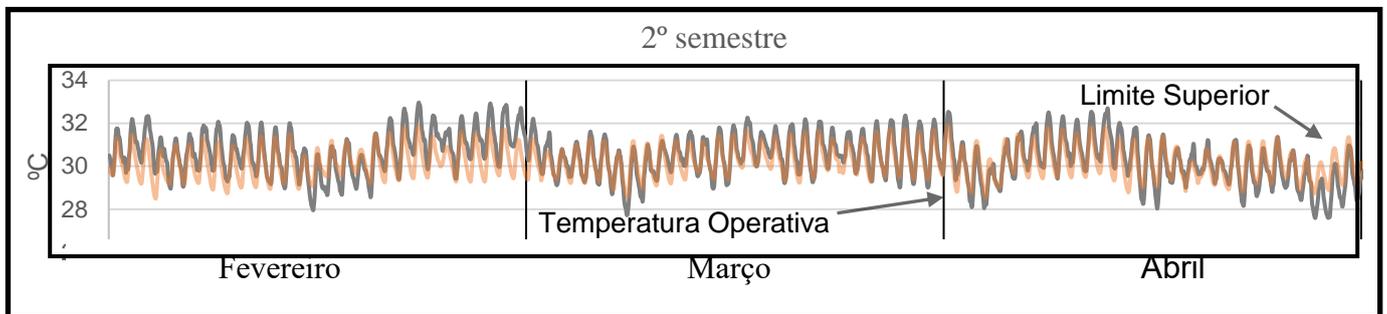


Gráfico 10: Temperaturas da fachada Sul para o piso inferior, 2º semestre

Relativamente ao piso inferior, as temperaturas são inferiores. Desta forma, estas salas apresentam temperaturas superiores ao limite em 30% das horas ocupadas.

- Oeste

Para uma orientação da fachada para Oeste, os resultados já são ligeiramente diferentes.

Nos gráficos 11 e 12 podemos observar as temperaturas para a sala do piso superior.

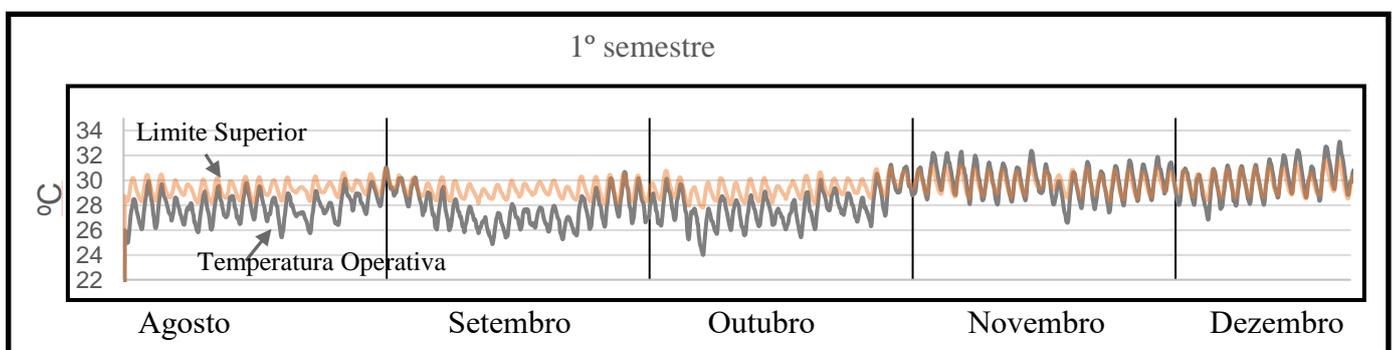


Gráfico 11: Temperaturas da fachada Oeste para o piso superior 1º semestre

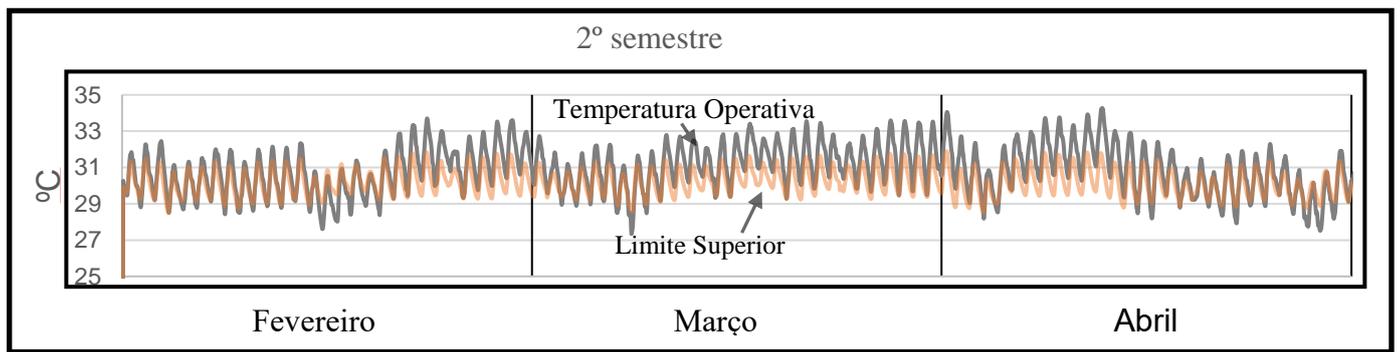


Gráfico 12: Temperaturas da fachada Oeste para o piso superior 2º semestre

Na fachada orientada a Oeste, as temperaturas são significativamente mais elevadas devido à falta de ventilação natural.

Como visto anteriormente, a orientação do vento é maioritariamente Sul e Sudoeste o que se traduz numa fraca ventilação natural em fachadas que não estejam nessa mesma orientação.

Neste caso, as temperaturas no interior da sala do piso superior são 58% superiores ao limite aceitável.

- Norte

Os gráficos 13 e 14 representam as temperaturas das salas orientadas a norte para o piso superior.

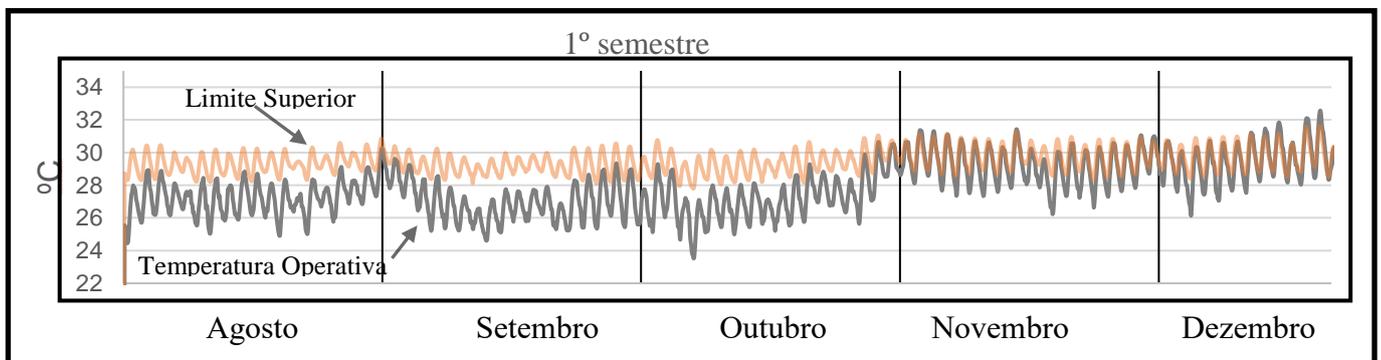


Gráfico 13: Temperaturas da fachada Norte para o piso superior 1º semestre

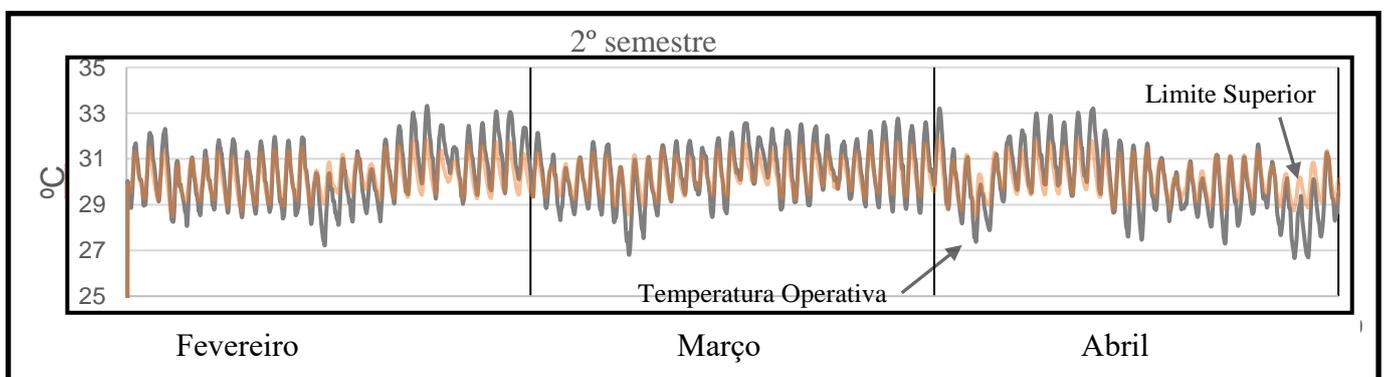


Gráfico 14: Temperaturas da fachada Norte para o piso superior 2º semestre

Na sala do piso superior as temperaturas são 38% acima dos limites aceitáveis.

Relativamente ao piso inferior das salas com orientação a Norte, podemos observar os resultados nos gráficos 15 e 16.

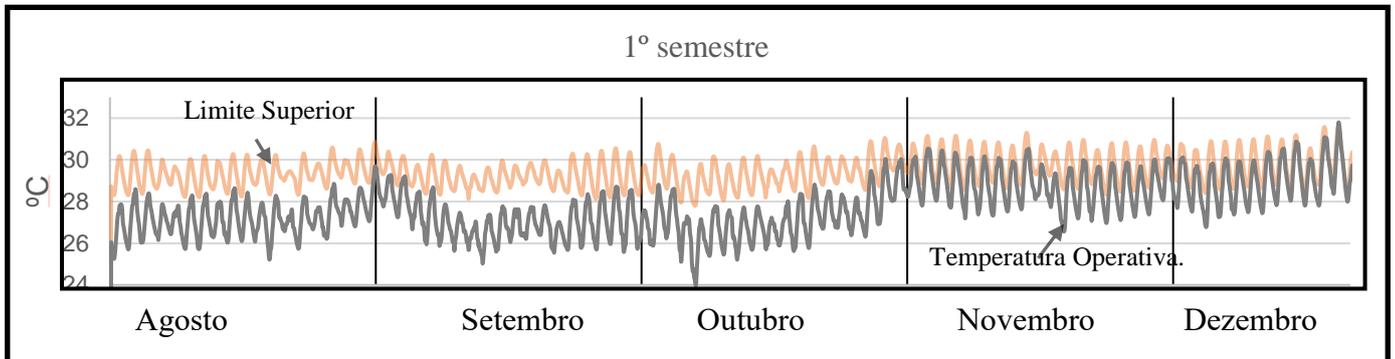


Gráfico 15: Temperaturas da fachada Norte para o piso inferior 1º semestre

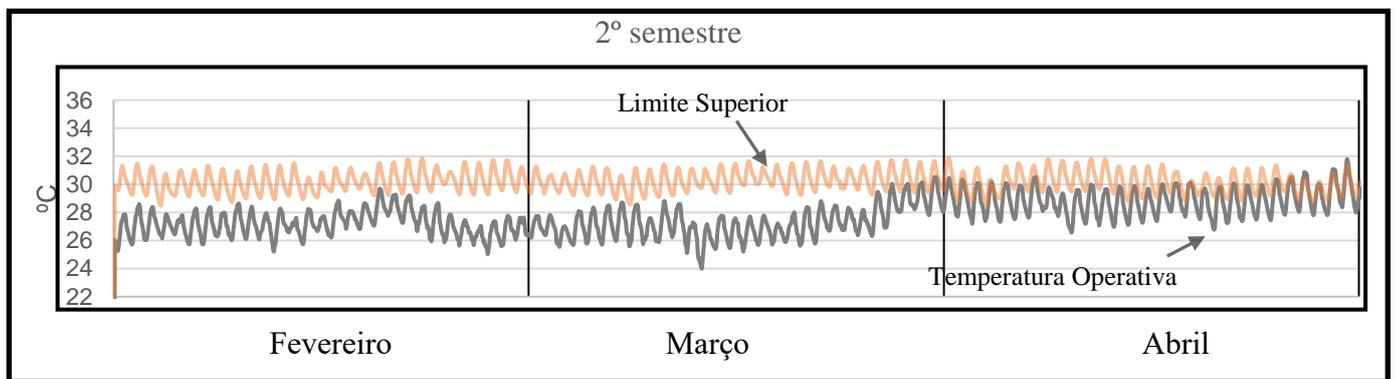


Gráfico 16: Temperaturas da fachada Norte para o piso inferior 2º semestre

O piso inferior é uma vez mais o que tem uma temperatura mais baixa relativamente ao piso superior. Neste caso, este piso apresenta uma percentagem de horas de desconforto cifrada nos 21%.

Modelo 2

Sul

Nesta secção podemos observar nos gráficos 17 e 18 as temperaturas para a sala do piso superior com a fachada orientada a sul

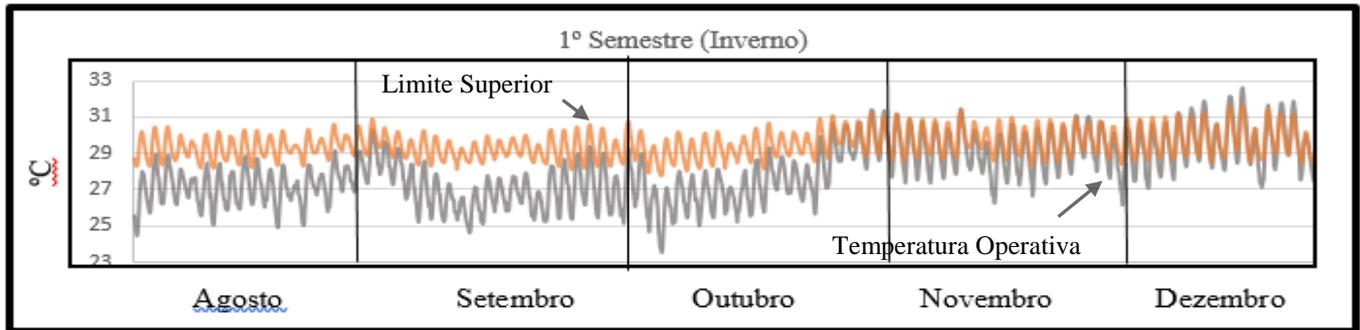


Gráfico 17: Temperaturas da fachada Sul para o piso superior 1º semestre, modelo 2

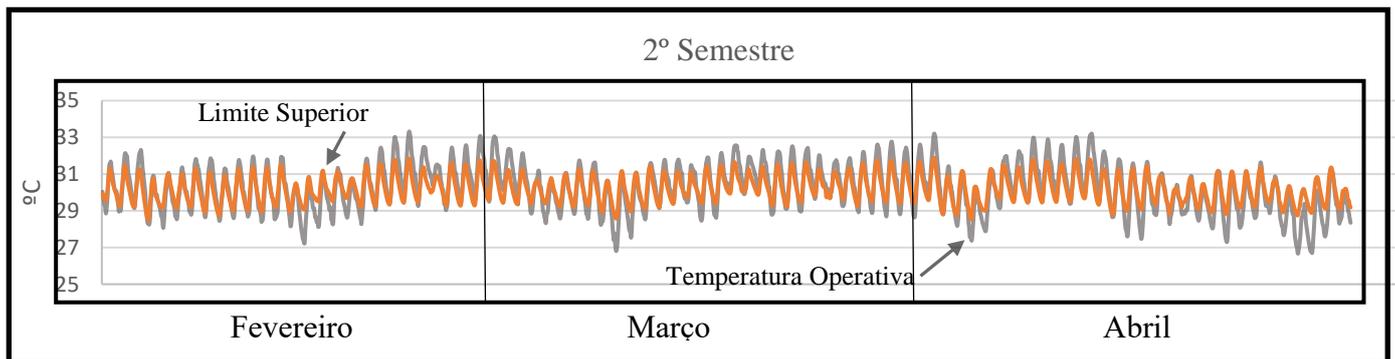


Gráfico 18: Temperaturas da fachada Sul para o piso superior 2º semestre, modelo 2

Com a configuração acima descrita, a sala apresenta temperaturas acima do aceitável durante 38% das horas de ocupação.

Relativamente à sala do piso inferior, podemos observar os dados da temperatura no seu interior nos gráficos 19 e 20 .

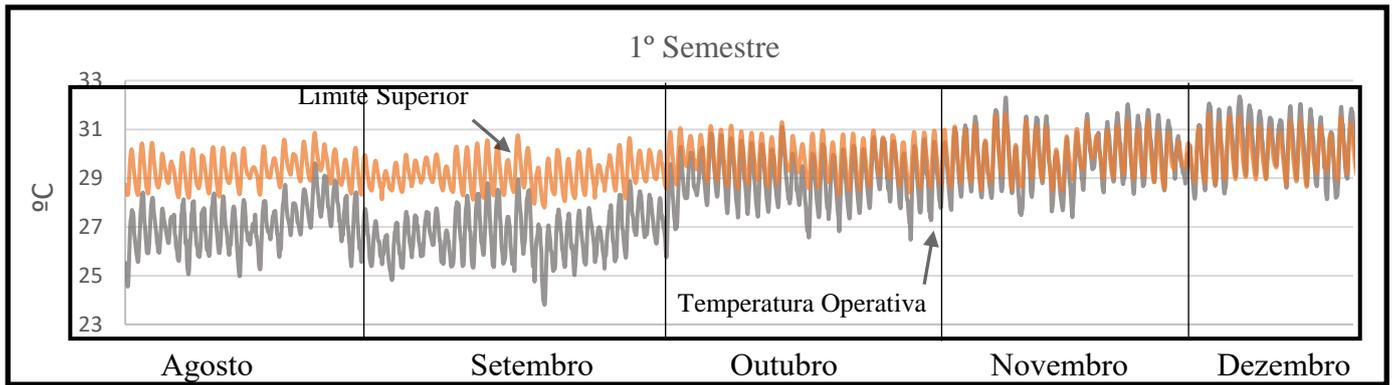


Gráfico 19: Temperaturas da fachada Sul para o piso inferior 1º semestre, modelo 2

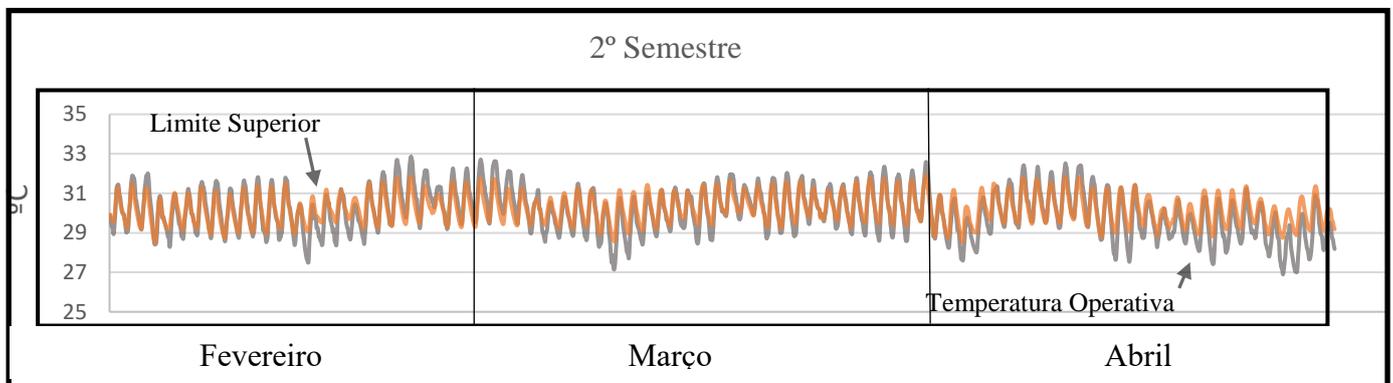


Gráfico 20: Temperaturas da fachada Sul para o piso inferior 2º semestre, modelo 2

Desta forma podemos aferir que a percentagem de horas acima do limite máximo é de 28%.

- Norte

No gráfico 21 e 22 podemos observar as temperaturas da sala do piso superior na fachada com a orientação a Norte

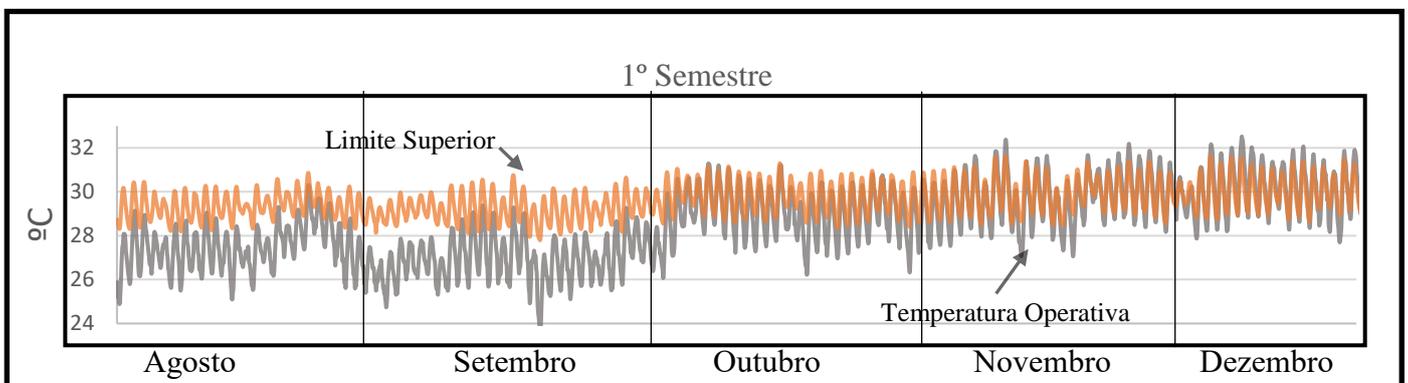


Gráfico 21: Temperaturas da fachada Norte para o piso superior 1º semestre, modelo 2

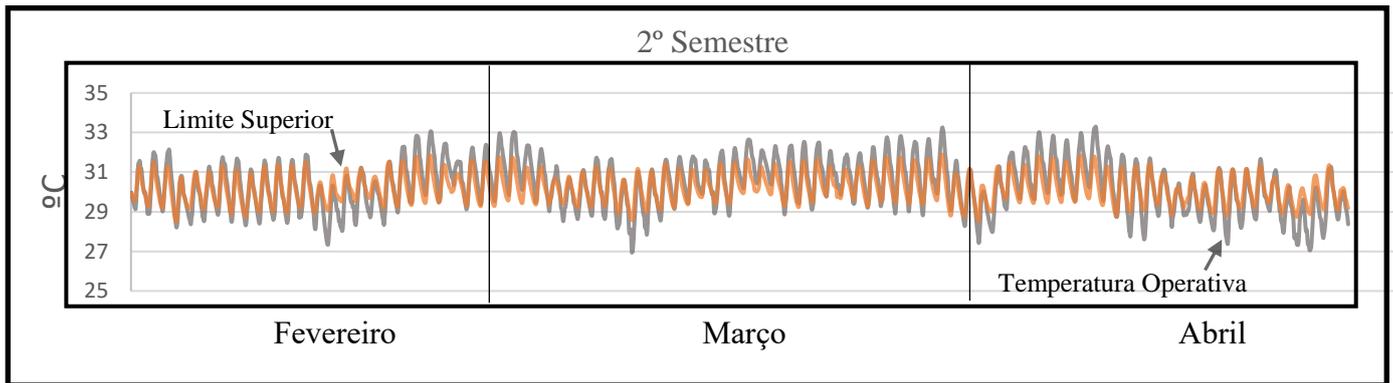


Gráfico 22: Temperaturas da fachada Norte para o piso superior 1º semestre, modelo 2

A percentagem de horas que a sala do piso superior orientada a Norte se encontra a uma temperatura no seu interior superior à temperatura máxima aceitável é de 35%.

Os gráficos 23 e 24 representam a temperatura no interior da sala do piso inferior.

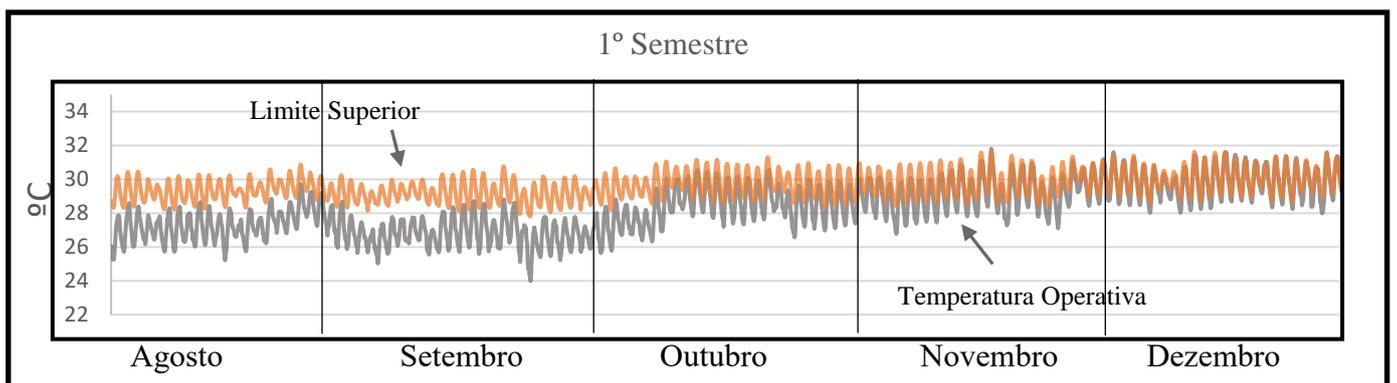


Gráfico 23: Temperaturas da fachada Norte para o piso inferior 1º semestre, modelo 2

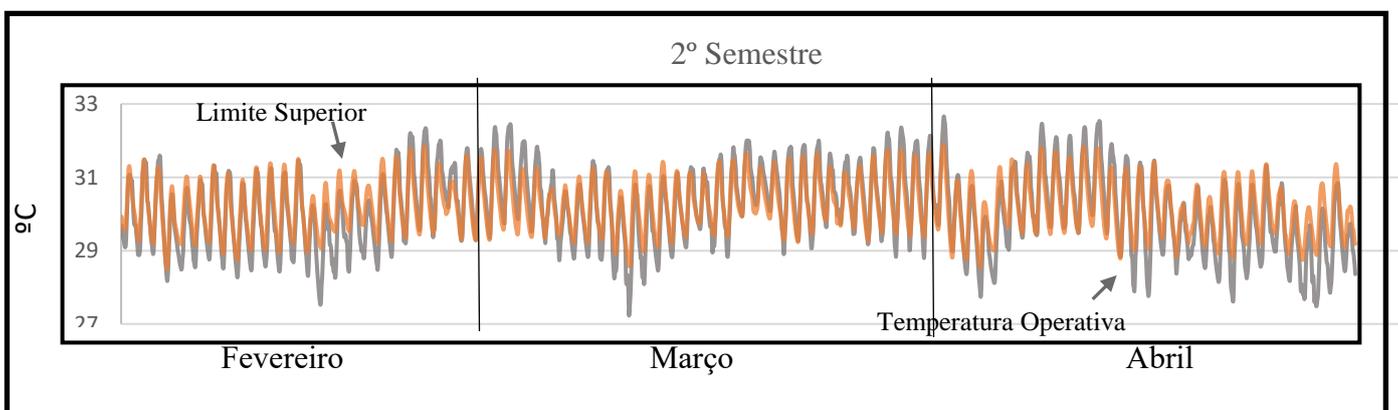


Gráfico 24: Temperaturas da fachada Norte para o piso inferior 2º semestre, modelo 2

Com esta configuração foram obtidas 18% de horas em que a temperatura no interior da sala é superior ao limite.

- Oeste

Como foi definido anteriormente, a fachada Oeste apenas foi simulada uma sala no piso superior.

Desta forma, no gráfico 25 e 26 estão demonstradas as temperaturas no interior do piso superior para a fachada virada a Oeste.

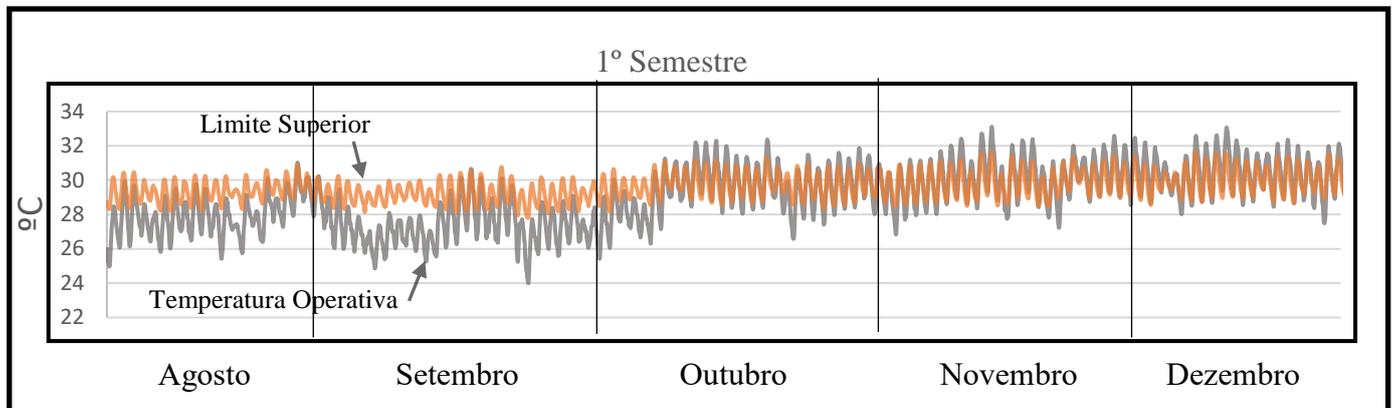


Gráfico 25: Temperaturas da fachada Oeste para o piso superior 1º semestre, modelo 2

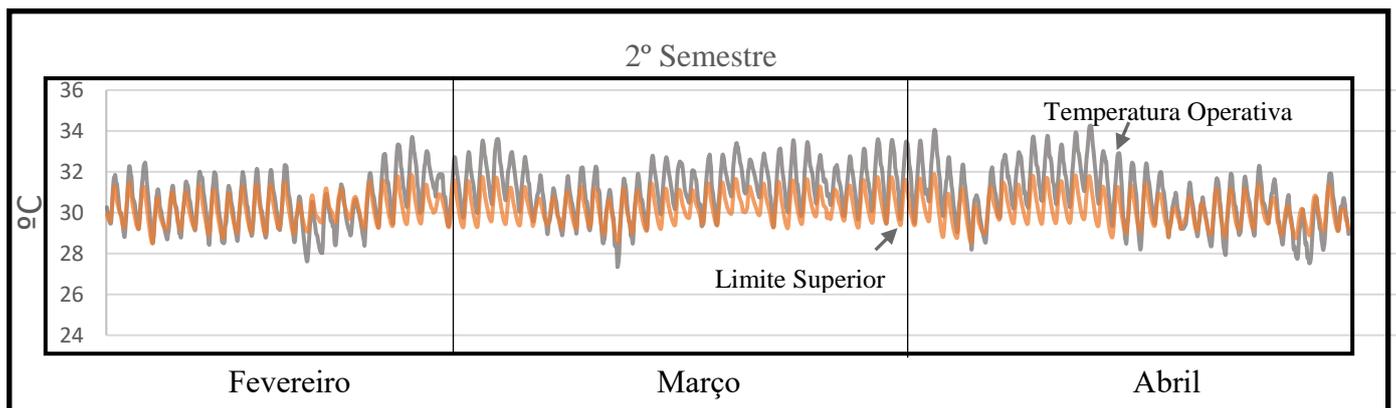


Gráfico 26: Temperaturas da fachada Oeste para o piso superior 2º semestre, modelo 2

Através da análise destes resultados foi possível verificar que esta solução apresenta 53% de horas em que os ocupantes estariam em desconforto.

Modelo 3

- Sul

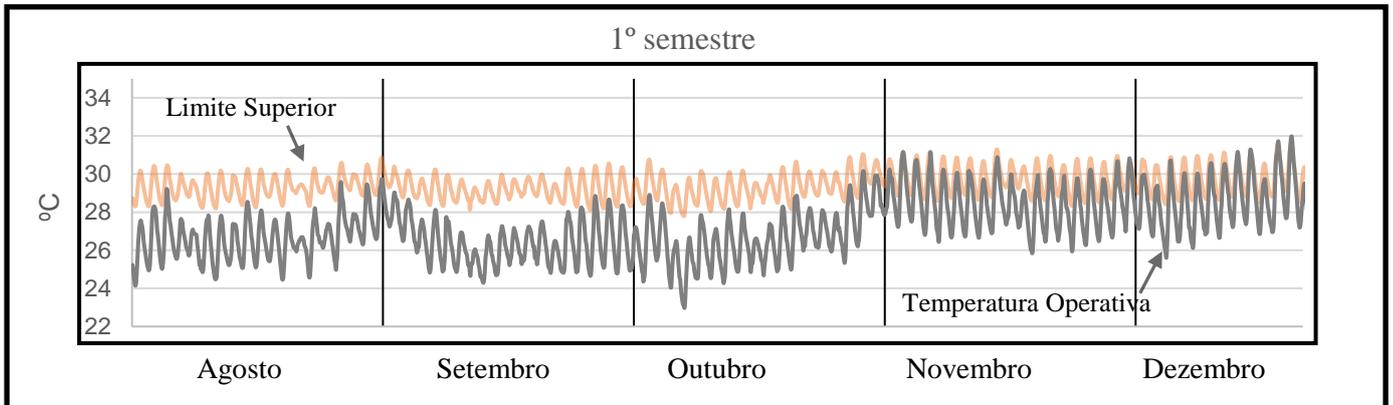


Gráfico 27: Temperaturas para a fachada Sul para o piso superior 1º semestre, modelo 3

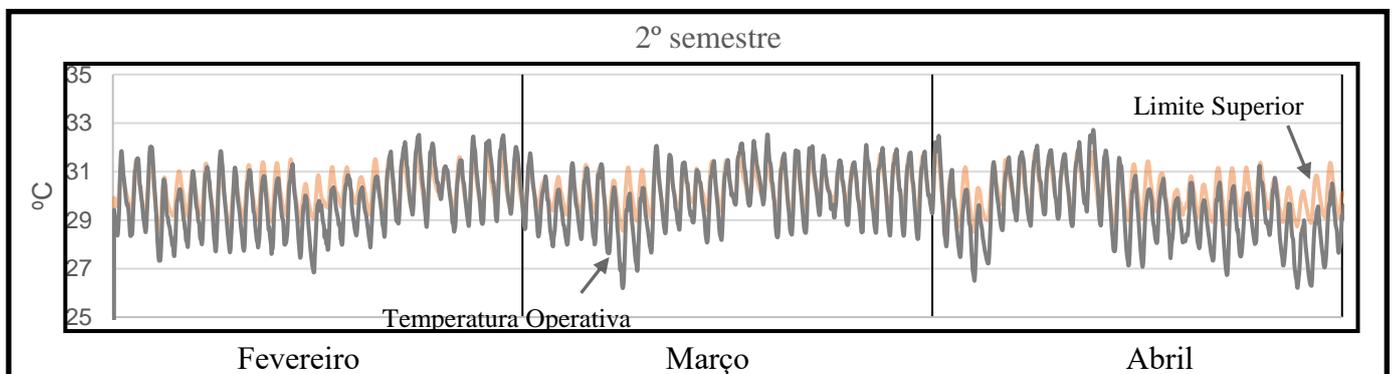


Gráfico 28: Temperaturas da fachada Sul para o piso superior 2º semestre, modelo 3

Com esta configuração, a temperatura no interior da sala irá ser superior à temperatura suportada pelos ocupantes em apenas 20% das horas de ocupação.

Relativamente à sala do piso inferior podemos observar as temperaturas nos gráficos 29 e 30.

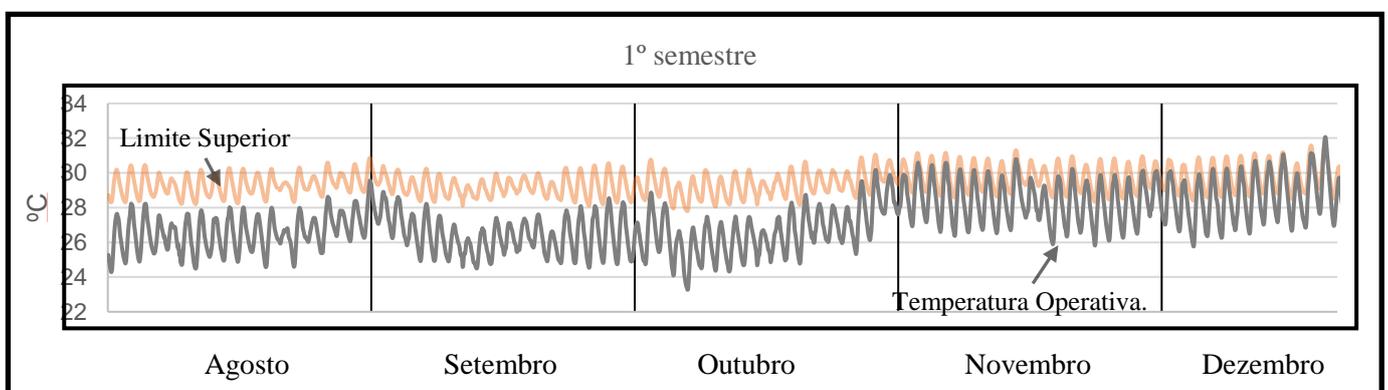


Gráfico 29: Temperaturas da fachada Sul para o piso inferior 1º semestre, modelo 3

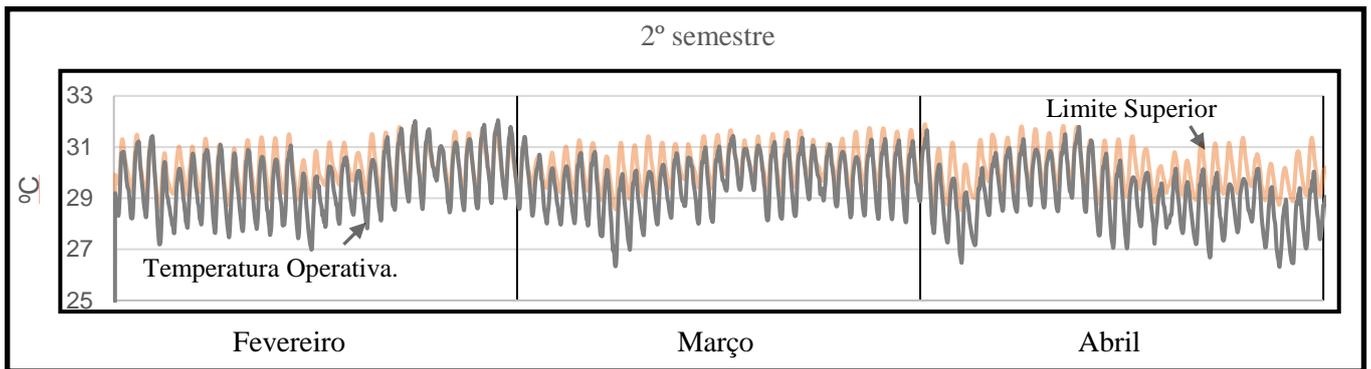


Gráfico 30: Temperaturas da fachada Sul para o piso inferior 2º semestre, modelo 3

Para as salas com a fachada orientada a sul do piso térreo foi possível obter uma percentagem de apenas 6% de horas acima do limite suportável.

- Oeste

Mais uma vez a fachada orientada a Oeste tem apenas simulada a sala do piso superior. Assim desta forma, nos gráficos podemos observar as temperaturas simuladas para a sala do piso superior

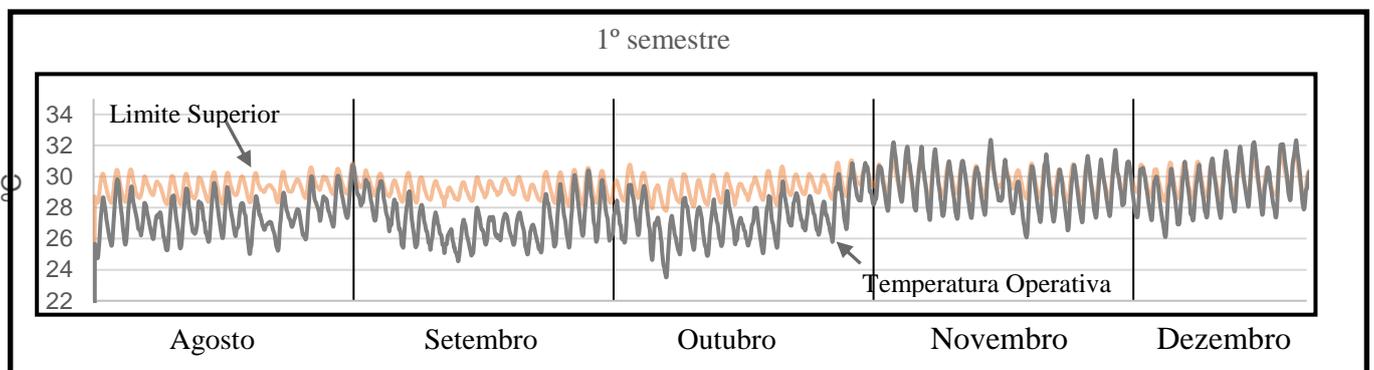


Gráfico 31: Temperaturas da fachada Oeste para o piso superior 1º semestre, modelo 3

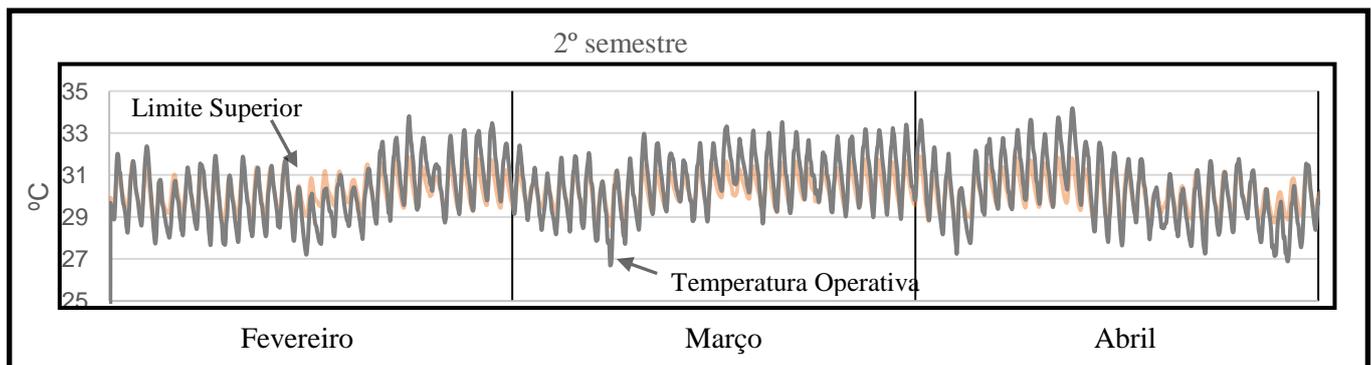


Gráfico 32: Temperaturas da fachada Oeste para o piso superior 2º semestre, modelo 3

Foram verificadas para esta orientação uma percentagem de 37% de horas acima do limite superior de aceitação por parte dos ocupantes.

- Norte

Nos gráficos 33 e 34 estão representadas as temperaturas no interior da sala do piso superior com a fachada orientada a Norte.

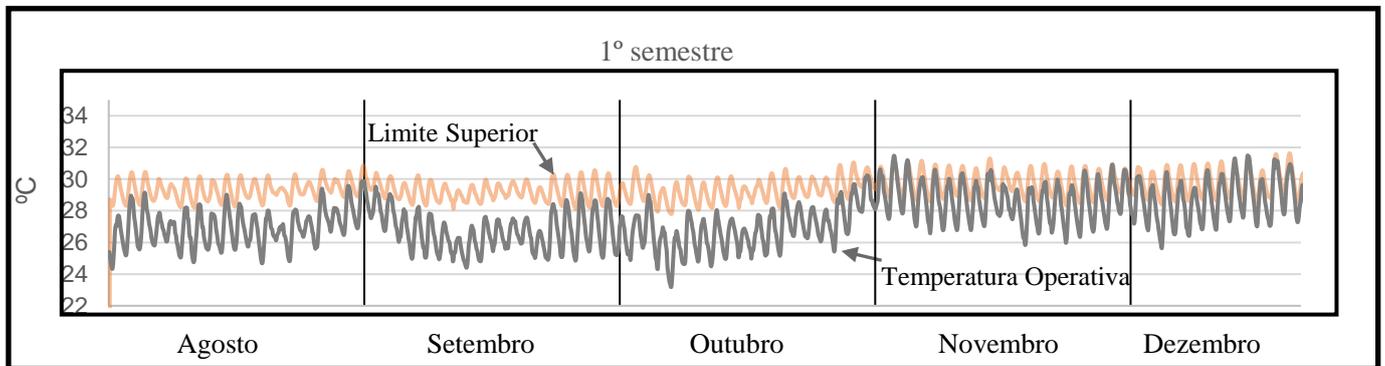


Gráfico 33: Temperaturas da fachada Norte para o piso superior 1º semestre, modelo 3

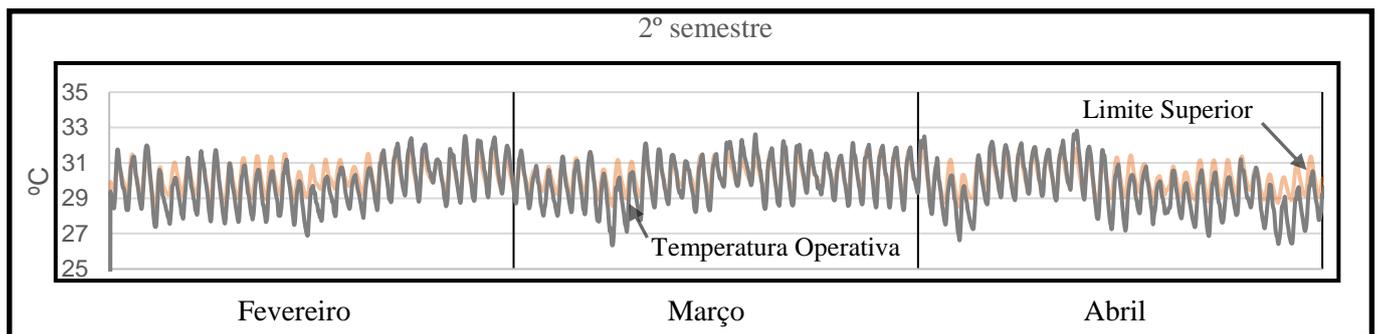


Gráfico 34: Temperaturas da fachada Norte para o piso superior 2º semestre, modelo 3

Neste cenário foi obtida uma percentagem de 17% de horas acima do limite superior de aceitação por parte dos ocupantes.

Os gráficos 35 e 36 referentes ao piso inferior da fachada orientada a Norte podem ser observados de seguida.

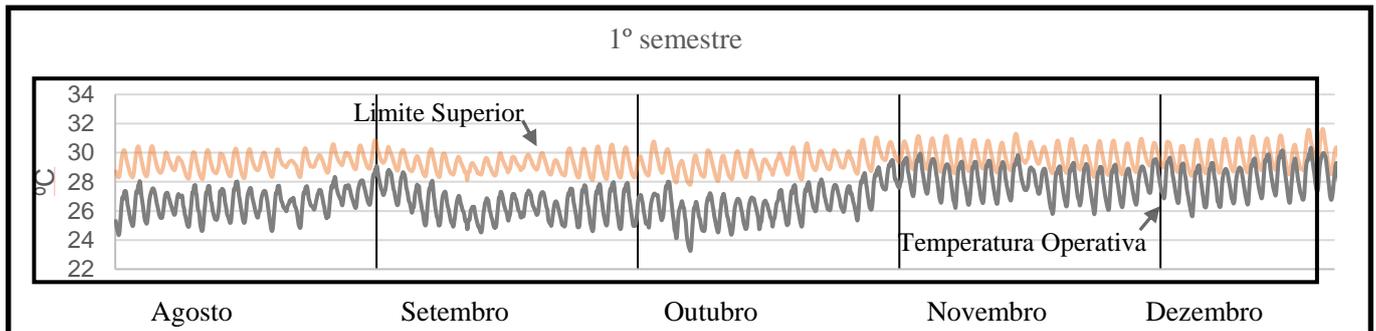


Gráfico 35: Temperaturas da fachada Norte para o piso inferior 1º semestre, modelo 3

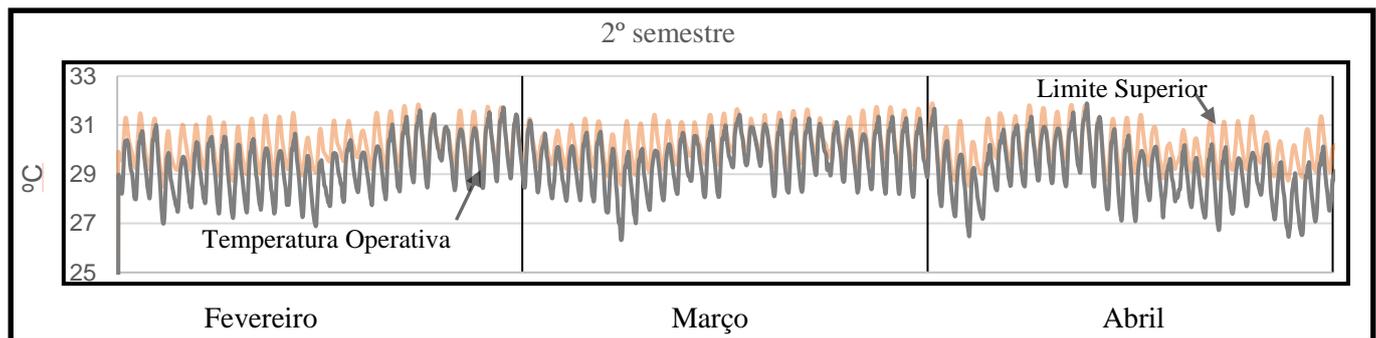


Gráfico 36: Temperatura da fachada Norte para o piso inferior 2º semestre, modelo 3

Como podemos observar através dos gráficos, é possível perceber a quase inexistência de horas em que a temperatura operativa no interior da sala é superior à temperatura limite suportável. Sendo mais específico, existem apenas 2% de horas a nível anual em que a temperatura operativa é superior deixando os ocupantes em desconforto.

#### Modelo 4

- Sul

Uma vez mais será apresentado nos gráficos 37 e 38 as simulações térmicas para as salas da fachada orientada a Sul.

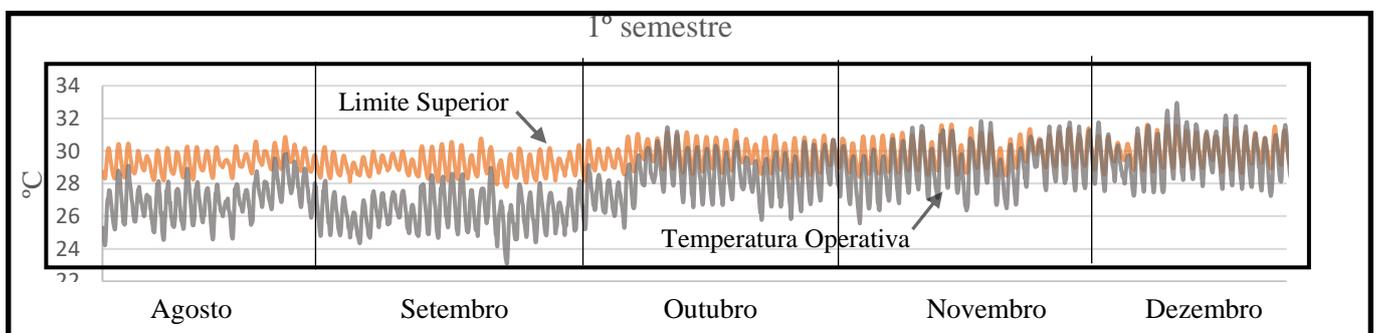


Gráfico 37: Temperatura da fachada Sul para o piso superior 1º semestre, modelo 4

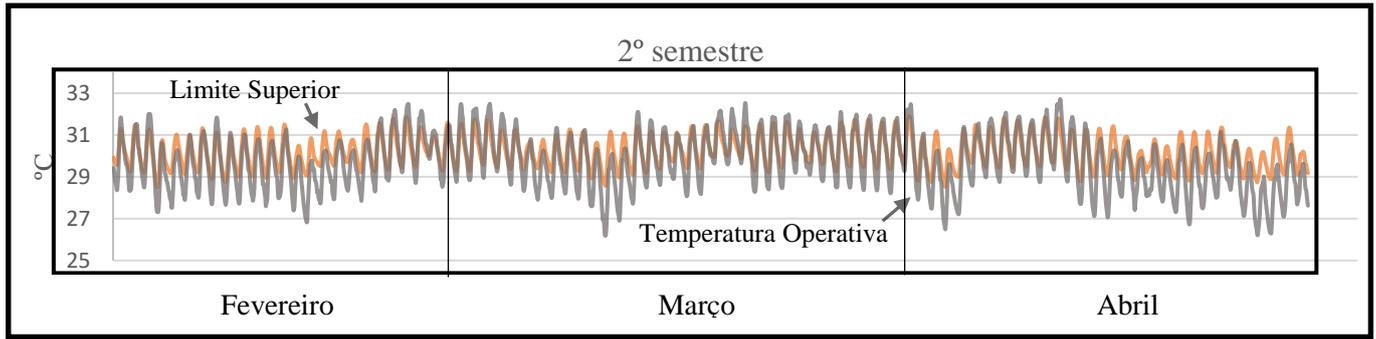


Gráfico 38: Temperatura da fachada Sul para o piso superior 2º semestre, modelo 4

Esta solução seria teoricamente a melhor solução apresentada. Com a adição do sistema de ventilação natural e o sombreamento externo, era de esperar os melhores resultados de simulação da temperatura no interior da sala.

Assim, foram obtidas apenas 19% de horas durante a ocupação do ano letivo em que a temperatura da sala traz desconforto aos ocupantes na sala de cima.

Nos gráficos 39 e 40 podemos observar as temperaturas durante o ano letivo para a sala do piso

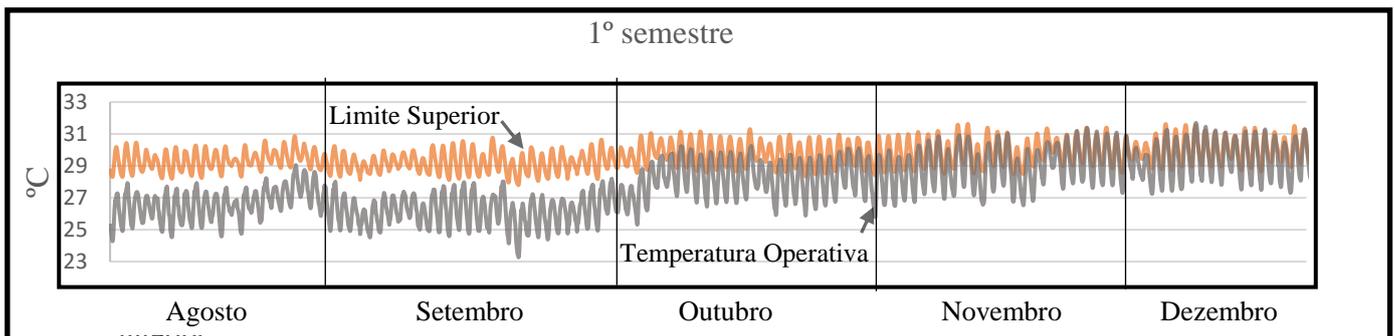


Gráfico 39: Temperatura da fachada Sul para o piso inferior 1º semestre, modelo 4

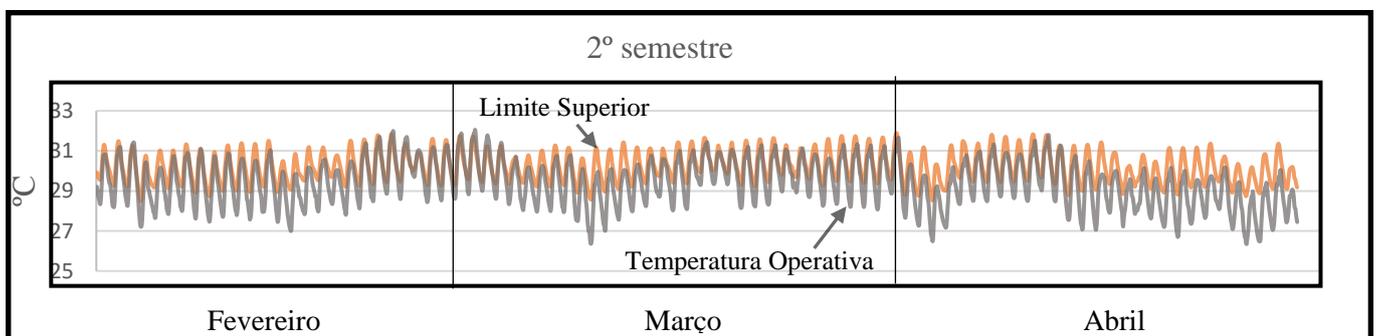


Gráfico 40: Temperatura da fachada Sul para o piso inferior 2º semestre, modelo 4

Através da análise dos dados desta simulação foi possível obter um valor de apenas 6% de horas em que os ocupantes estarão em desconforto durante a sua permanência no período letivo.

- Oeste

A simulação seguinte é mais uma vez feita apenas para o piso superior. Desta forma, nos gráficos 41 e 42 podemos observar as temperaturas nas salas com a fachada orientada a Oeste do piso superior da faculdade.

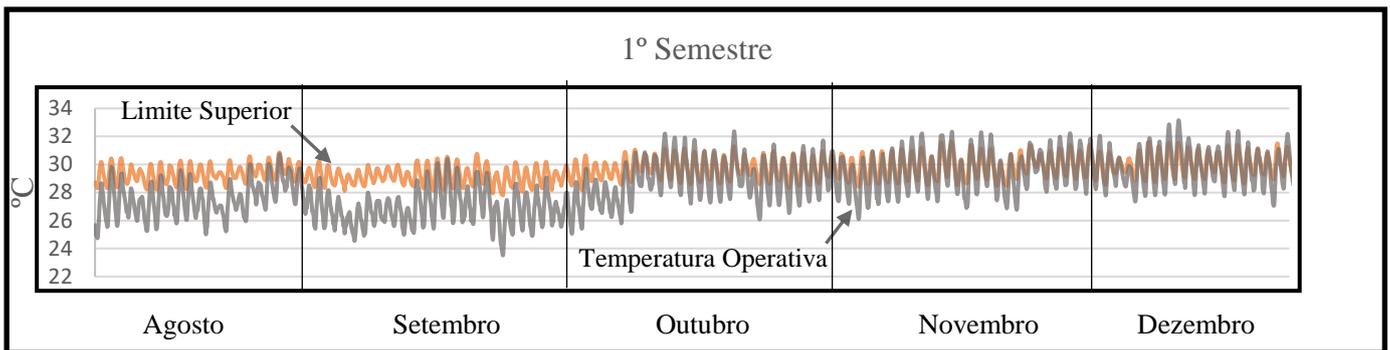


Gráfico 41: Temperatura da fachada Oeste para o piso superior 1º semestre, modelo 4

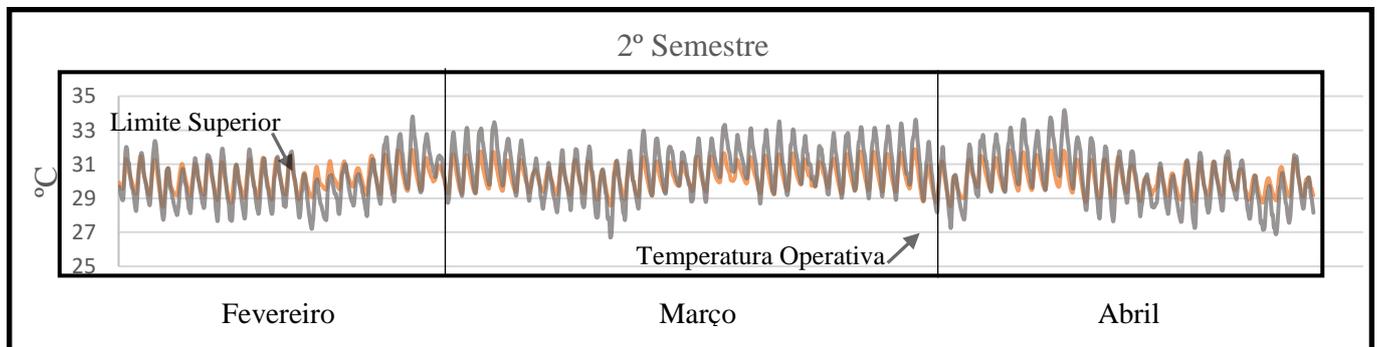


Gráfico 42: Temperatura da fachada Oeste para o piso superior 2º semestre, modelo 4

Relativamente à fachada com orientação a Oeste, a sala do piso superior apresenta uma percentagem de horas de 30% em que os ocupantes estariam em desconforto.

- Norte

As temperaturas no interior das salas no piso superior para a fachada orientada a Norte estão representadas nos gráficos 43 e 44.

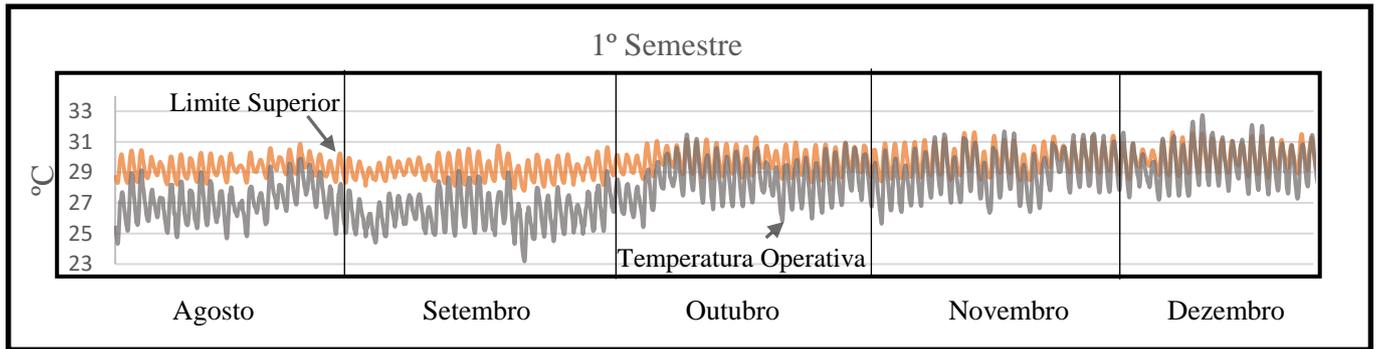


Gráfico 43: Temperatura da fachada Norte para o piso superior 1º semestre, modelo 4

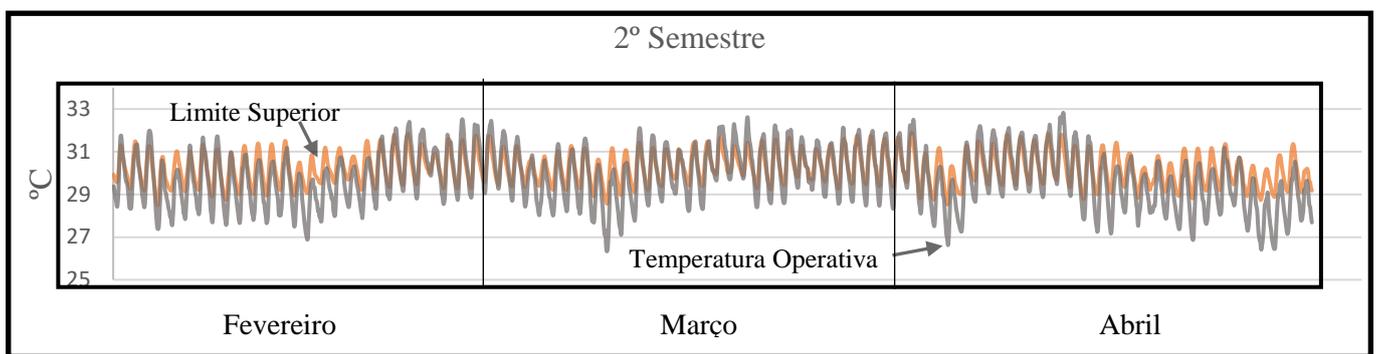


Gráfico 44: Temperatura da fachada Norte para o piso superior 2º semestre, modelo 4

Esta configuração apresenta apenas 16% de horas de desconforto no interior das salas de aula.

Para o piso inferior podemos observar os gráficos 45 e 45 representados de seguida.

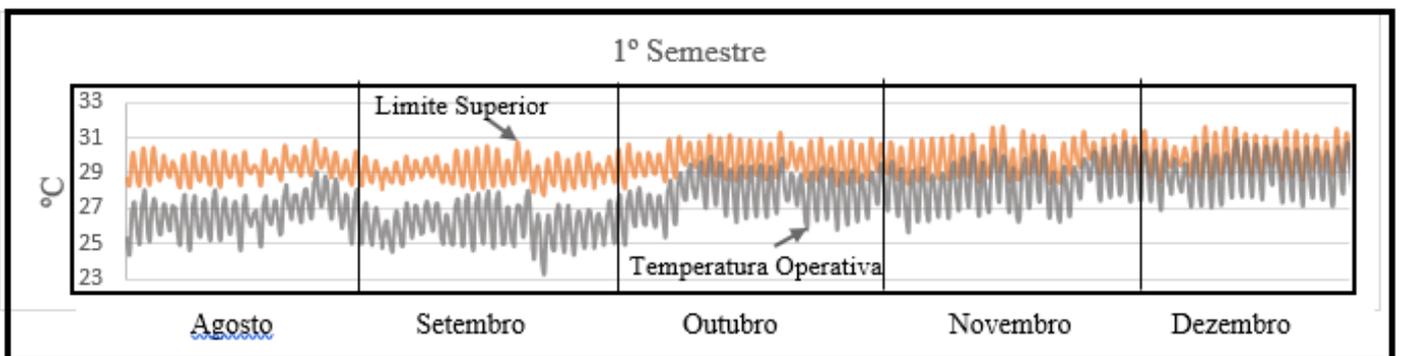


Gráfico 45: Temperatura da fachada Norte para o piso inferior 1º semestre, modelo 4

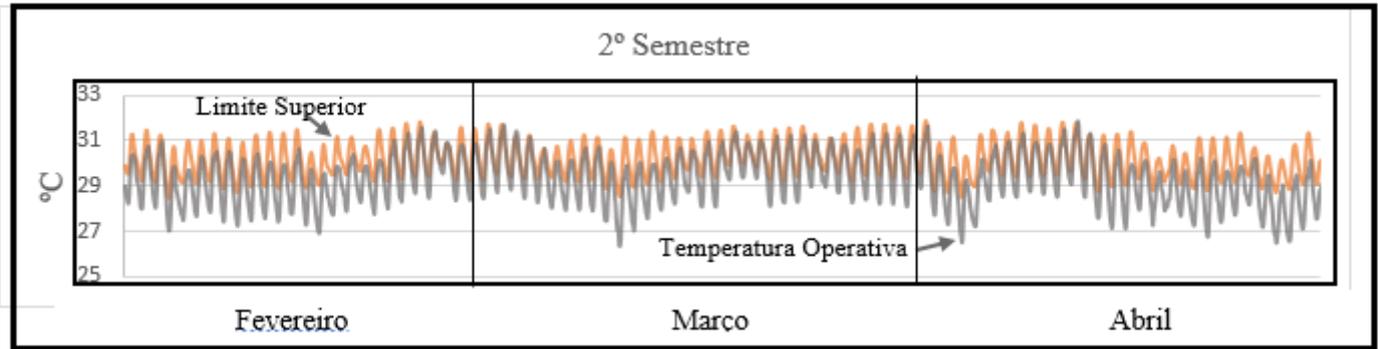


Gráfico 46: Temperatura da fachada Norte para o piso inferior 2º semestre, modelo 4

Como é possível observar através dos gráficos, não são quase percebidas horas em desconforto nestas salas. Relativamente ao gráfico 45 não há qualquer hora durante o semestre em que os alunos estejam em desconforto, no entanto, existem algumas horas ainda durante o 2º semestre, perfazendo um total de 1% de horas de desconforto com esta configuração.

De forma a sintetizar melhor os resultados, estão apresentadas de seguida as tabelas onde está contida toda a informação relativamente às simulações previamente explicadas.

Irão ser mostrados os resultados

### Modelo 1

Tabela 7: Percentagem de horas de desconforto para o modelo 1

	Orientação		
	Norte	Oeste	Sul
Piso Superior	38%	58%	40%
Piso Inferior	21%		30%

### Modelo 2

Tabela 8: Percentagem de horas de desconforto para o modelo 2

	Orientação		
	Norte	Oeste	Sul
Piso Superior	35%	53%	38%
Piso Inferior	18%		28%

### Modelo 3

Tabela 9: Percentagem de horas de desconforto para o modelo 3

	Orientação		
	Norte	Oeste	Sul
Piso Superior	17%	37%	20%
Piso Inferior	2%		6%

### Modelo 4

Tabela 10: Percentagem de horas de desconforto para o modelo 4

	Orientação		
	Norte	Oeste	Sul
Piso Superior	16%	30%	19%
Piso Inferior	1%		6%

Depois de analisada toda a informação acima descrita, o modelo 4 é onde se podem observar os melhores resultados. Existe uma grande diferença relativamente ao número de horas de desconforto desde o momento em que se procede à utilização de chaminés para ventilar naturalmente as salas de aulas.

A introdução de sombreamento exterior como se pode observar no modelo 2 não traz grandes melhorias a nível de conforto térmico no interior do edifício. Foi já explicado que os dois maiores fatores que poderão alterar o conforto no interior de um edifício são a temperatura exterior e os ganhos solares e, através das simulações feitas, podemos constatar que em países já com elevadas temperaturas do ar exterior, este não traz uma grande diferença. Entre o modelo 1 e o modelo 2, existe uma diferença média de apenas 3% de diminuição de horas de desconforto. Esta diferença é bastante pequena na teoria, mas a introdução de sombreamento a nível exterior representa ainda uma diminuição de aproximadamente 260h a nível anual o que embora pareça pouco, é ainda significativo.

No entanto, a grande diferença situa-se na introdução de um método de ventilação natural estudado. Uma vez que a cidade estudada tem, na sua grande maioria, uma orientação do vento de Sul-Sudoeste, todas as fachadas que não estão orientadas a favor desta orientação apresentam resultados muito pobres quando é apenas aplicado um sistema de *Cross Ventilation* como no modelo 1 onde existem sempre grandes percentagens de horas de desconforto a nível anual.

A introdução do sistema de ventilação através das chaminés reproduziu-se numa diminuição acentuada de 21% de horas de desconforto. Esta diminuição representa mais de 1839 horas anuais em que os ocupantes estão dentro dos limites do seu conforto térmico.

A adição de ambos os sistemas, ou seja, o modelo 4 não trouxe uma grande diferença em termos de percentagens para a climatização no interior das salas. Como já se tinha visto através da comparação

do modelo 1 com o modelo 2, a introdução de sombreamento exterior em salas já com o sistema de chaminés traz apenas, uma vez mais diferenças percentuais em média de 3%.

## 5.1 Configuração Final

Como foi referido anteriormente, o Gana é um país com uma economia bastante debilitada e a diminuição de custos era uma, se não a maior, prioridade.

Desta forma, depois de analisados os modelos e tratados os resultados, todas as configurações de ventilação natural para o edifício em questão não foram adjudicadas pela Universidade.

Desta forma, a única solução possível e viável para a ventilação natural do edifício estava dependente de um tipo de ventilação relacionada com o *Cross Ventilation*.

Desta forma, a solução encontrada passou por alterar o tipo de janelas existentes no edifício.

Aproveitando a fluabilidade do ar e as elevadas temperaturas sentidas no interior das salas, foi definido que as janelas teriam de ser basculantes como podemos ver na figura 19.

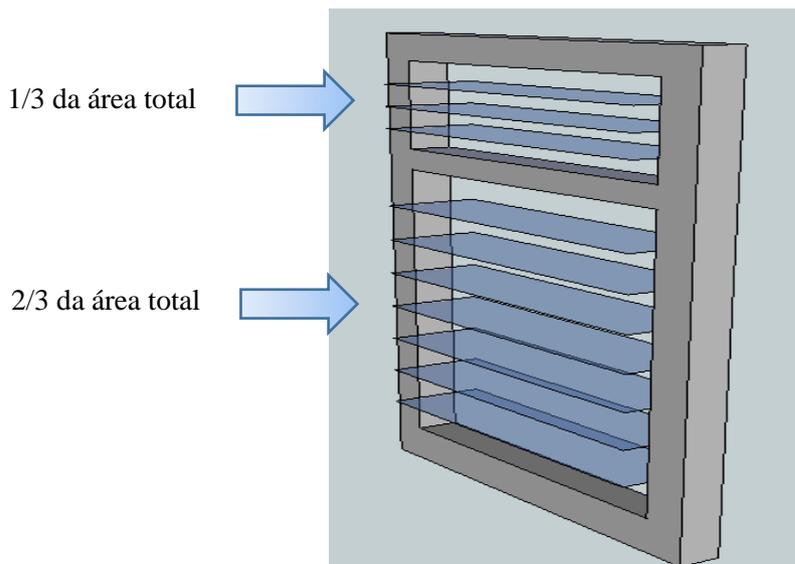


Figura 19: Modelo de janela basculante a ser implementada na universidade

Desta forma, o modelo ficará uma vez mais sem as chaminés e com uma configuração como podemos ver na figura 20.

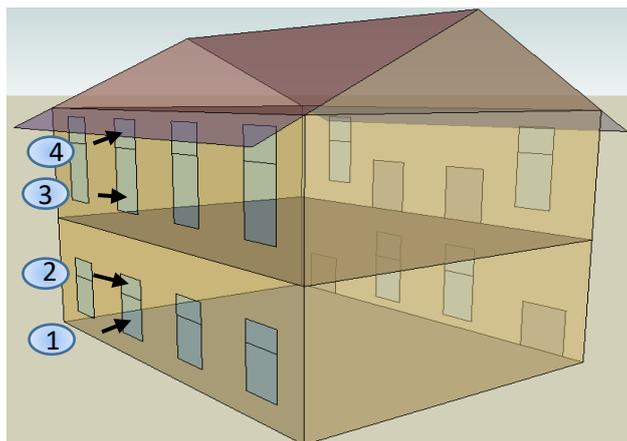


Figura 20: Configuração final do modelo a ser utilizado

Na tabela 11 podemos observar o tipo de abertura que está associado a cada tipo de sala, diferenciando apenas as áreas entre o piso superior e o piso inferior.

Tabela 11: Áreas de aberturas da configuração final

Abertura	% Área aberta/área da sala	Área de abertura (m <sup>2</sup> )	Número de aberturas por sala	Área total de aberturas (m <sup>2</sup> )
1	1.3	2.5	6	15
2	0.6	1.2	6	7.2
3	1.7	3.3	6	19.8
4	0.8	1.6	6	9.6

As soluções de aplicação desta solução dependem bastante do modelo adaptativo e também do conforto sentido no interior da sala.

Desta forma, como é impossível controlar o comportamento dos ocupantes, foram propostas duas abordagens a este sistema de ventilação a ser adotado pelos ocupantes consoante a necessidade de arrefecimento da sala.

A figura 21 representam os modelos das propostas apresentadas para um dia regular

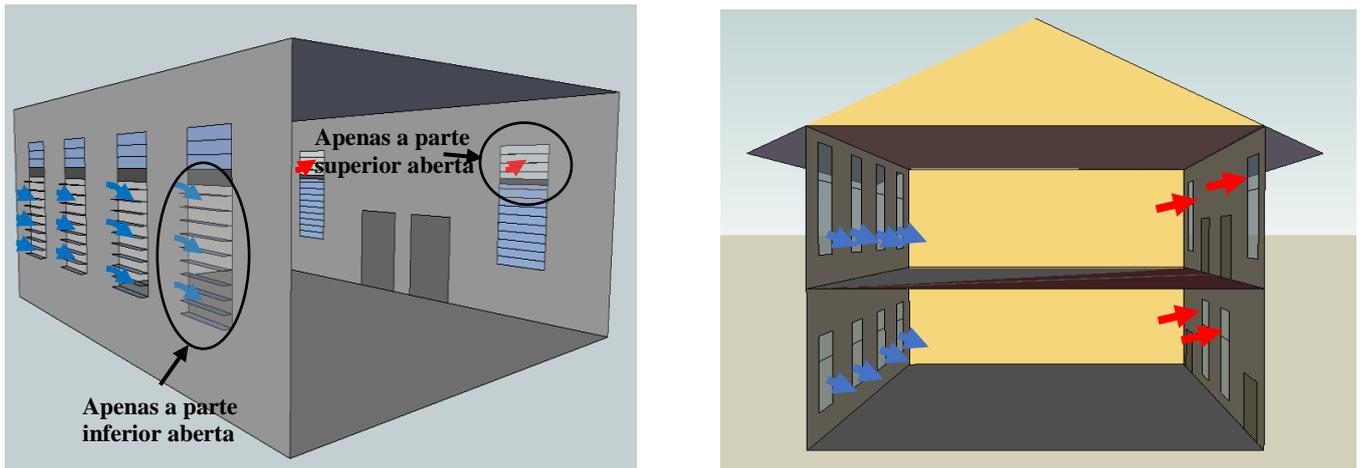


Figura 21: Esquema de ventilação final para um dia normal

Como é possível observar pela figura 18, esta configuração propõe que para um dia usual, as janelas orientadas para o exterior da faculdade permaneçam abertas apenas na sua parte inferior e mantendo a parte superior fechada. Na fachada orientada para o interior do edifício apenas iriam ser abertas a parte superior das janelas.

Embora seja uma abordagem extremamente rudimentar, esta configuração irá promover a deslocação do ar no interior da sala através da mesma abordagem que foi escolhida para o recurso das chaminés.

Dada a elevada fluotabilidade do ar, este ao vir do exterior a uma temperatura inferior, vai aquecer devido maioritariamente aos ganhos internos e solares da sala. Este ar no interior da sala ao aquecer irá consequentemente subir e ser extraído para o exterior através das grelhas na parte superior da janela do lado oposto da sala. Isto faz com que a diferença de pressão do interior da sala para o exterior traga ar do exterior através das aberturas inferiores da janela.

As elevadas temperaturas sentidas no Gana durante todo o ano não permitem que a solução supracitada seja utilizada durante o decorrer de todo o ano.

Assim, desta forma, foi apresentada uma proposta para dias em que a temperatura esteja acima da média.

Esta proposta pode ser analisada através da figura 22.

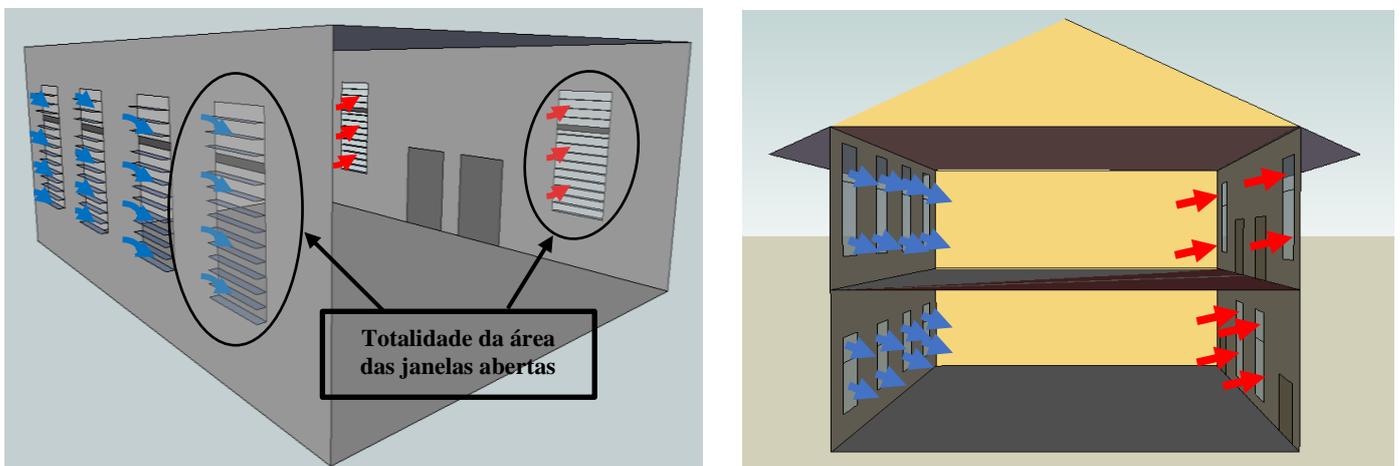


Figura 22: Esquema de ventilação final para um dia quente

Durante os dias em que a temperatura seja demasiado elevada é proposto que todas as aberturas das janelas estejam completamente abertas para promover o máximo de deslocação de ar no interior da sala.

Estes modelos têm uma grande dependência com as velocidades do vento no exterior do edifício. Como foi estudado anteriormente, o vento tem uma orientação bastante predominante e uma velocidade média máxima diária que chega aos 12 km/h.

Estas condições fazem com que todas as fachadas que não estão orientadas a Sul não tenham um grande deslocamento de ar no interior trazendo um elevado desconforto para os ocupantes.

Não é, de todo, a melhor solução para as condições climatéricas do país, mas foi a única solução proposta que foi aceite.

## Capítulo 6 - Conclusão

Através da realização desta dissertação, foi possível demonstrar a importância que as introduções de sistemas de ventilação natural podem ter ao ser introduzidos num edifício em climas equatoriais melhorando consideravelmente a sua permanência no interior.

Foi pedido que fosse estudada uma solução de ventilação natural para um edifício inserido na Universidade do Gana tendo como objetivo o controlo de temperaturas no interior das salas de aula tendo em constante consideração os constrangimentos económicos do país e da Universidade em concreto.

Após a simulação térmica do edifício com recurso ao *EnergyPlus*, foi possível constatar que as temperaturas no interior das salas de aula estarão sempre bastante elevadas levando a uma elevada percentagem de horas em que os ocupantes sentirão desconforto.

De todas as salas de aula simuladas, os pisos superiores são claramente mais afetados pela temperatura comparativamente com os pisos inferior. A orientação é também um fator importante uma vez que o vento tem uma grande predominância na sua direção, o que faz que as salas com a fachada orientada para Oeste não possuam grandes deslocamentos de ar no seu interior elevando posteriormente a sua temperatura. De todos os cenários estudados, o que apresenta piores resultados é o cenário 1 em que existe, em média, 40% de horas de desconforto ao longo do ano letivo.

Em sentido oposto, o cenário que apresenta melhores condições é o cenário 4 onde as temperaturas se situam fora dos limites de conforto em apenas aproximadamente 15% das horas do ano letivo concluindo que o sistema de ventilação natural implementado traria resultados significativos na redução da temperatura no interior das salas de aula.

No entanto, nenhum dos cenários foi aceite dados os elevados constrangimentos económicos, mesmo tendo em conta o baixo investimento monetário na introdução do sistema de ventilação natural do modelo 4, pelo que, foi necessário recorrer a um sistema ainda mais simplista alterando apenas a configuração das janelas modificando a estrutura inicial das mesmas para um tipo de janelas basculantes. Esta alteração possibilita ainda a introdução de *Displacement Ventilation* apenas para dias em que a temperatura esteja dentro dos parâmetros usuais, mudando a sua configuração para totalmente abertas em dias com temperaturas superiores ao normal passando o tipo de ventilação utilizada a ser apenas *Cross Ventilation*.

## Capítulo 7 - Referências Bibliográficas

- [1] Heather Chappells & Elizabeth Shove, Debating the future of comfort: environmental sustainability, energy consumption and the indoor environment, Pages 32-40 , Published online: 03 Feb 2007, <http://dx.doi.org/10.1080/0961321042000322762>
- [2] Rodrigues ,A. Moret; Piedade, A. C.; Braga, A. M., 2009. *Térmica em Edifícios*. Edições ORION. Isbn: 978-972-8620-13-4, 1ª Edição.
- [3] *Insulation - Principles and Calculations*, <http://fet.uwe.ac.uk/conweb/hi4web/principles/print.htm>, [Consultado em 29/08/2016]
- [4] Incropera, Frank P; Bergman, Theodore L; Lavine, Adrienne S; DeWitt, David P; *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 2011.
- [5] Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn, *Principles of Heat Transfer*, Seventh Edition, Cengage Learning, 2011.
- [6] Incropera, Frank P; Bergman, Theodore L; Lavine, Adrienne S; DeWitt, David P; *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 2011.
- [7] Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn, *Principles of Heat Transfer*, Seventh Edition, Cengage Learning, 2011.
- [8] Incropera, Frank P; Bergman, Theodore L; Lavine, Adrienne S; DeWitt, David P; *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 2011.
- [9] Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn, *Principles of Heat Transfer*, Seventh Edition, Cengage Learning, 2011.
- [10] Haojie Wang, Qingyan Chen, A semi-empirical model for studying the impact of thermal mass and cost-return analysis on mixed-mode ventilation in office buildings, *Energy and Buildings*, Volume 67, December 2013, Pages 267-274, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.025>
- [11] Tobias Schulze, Ursula Eicker, Controlled natural ventilation for energy efficient buildings, *Energy and Buildings*, Volume 56, January 2013, Pages 221-232, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.044>.
- [12] Annamaria Belleri, Roberto Lollini, Spencer M. Dutton, Natural ventilation design: An analysis of predicted and measured performance, *Building and Environment*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.009>.
- [13] Nuno Mateus – Validação de modelos de simulação térmica num edifício de dupla pele sem climatização, Lisboa, 2012, página 4. Dissertação de Mestrado, Engenharia da Energia e do Ambiente.
- [14] Nuno M. Mateus, Armando Pinto, Guilherme Carrilho da Graça, Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell, *Energy and Buildings*, Volume 75, June 2014, Pages 511-522, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.043>.

- [15] Nuno M. Mateus, Guilherme Carrilho da Graça, A validated three-node model for displacement ventilation, *Building and Environment*, Volume 84, January 2015, Pages 50-59, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.029>.
- [16] Zhiqiang (John) Zhai, Mary-Hall Johnson, Moncef Krarti, Assessment of natural and hybrid ventilation models in whole-building energy simulations, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issue 9, September 2011, Pages 2251-2261, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.026>.
- [17] Águas, M. P. (2001). *Conforto térmico - Métodos Instrumentais em Energia e Ambiente*.
- [18] Peter Höppe, Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort, *Energy and Buildings*, Volume 34, Issue 6, July 2002, Pages 661-665, ISSN 0378-7788, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00017-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00017-8).
- [19] Ted Stathopoulos, Pedestrian level winds and outdoor human comfort, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 94, Issue 11, November 2006, Pages 769-780, ISSN 0167-6105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2006.06.011>.
- [20] Peter Höppe, Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort, *Energy and Buildings*, Volume 34, Issue 6, July 2002, Pages 661-665, ISSN 0378-7788, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00017-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00017-8).
- [21] Graça, G. C. (2011). Apontamentos do módulo de Sistemas Energéticos em Edifícios. *Conforto Térmico*
- [22] Nicol, Fergus (2004) Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics
- [23] Nguyen, Anh Tuan et al, (2012) AN ADAPTIVE THERMAL COMFORT MODEL FOR HOT HUMID SOUTHEAST ASIA, *Building and Environment* 56
- [24] Graça, G. C. (2011). Apontamentos do módulo de Sistemas Energéticos em Edifícios. *Conforto Térmico*
- [25] Chen, Q.; Glicksman, L. (1999). Performance Evaluation and Development of Design Guidelines for Displacement Ventilation. MA.: ASHRAE.
- [26] Hamilton, Saphir D. et al, (2004) Displacement Ventilation, *Emerging Technologies*
- [27] Chen, Qingyan et al, (1999) Measurements and computations of room airflow with displacement ventilation
- [28] [Portaria n° 353-A/2013. D.R. I Série. 235 (2013-12-04) 6644-(2-10). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social. ]
- [29] Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril de 2006 do Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações Diário da República: I série A (2006) acedido em 17/03/2016, <http://www.adene.pt/sites/default/files/24162468.pdf>
- [30] Lanham, A., & al., e. (Junho de 2004). Arquitectura bioclimática. *Perspectivas de inovação e futuro -Seminários de Inovação* .
- [31] Carroll, J.J. Global transmissivity and diffuse fraction of solar radiation for clear and cloudy skies as measured and as predicted by bulk transmissivity models. *Solar Energy* 1985, 35, 105–118
- [32] Duffie, J. A., & Beckman, W. (1991). *Solar engineering of thermal processes* (2nd ed. ed.). New York: John Wiley & Sons.

- [33] Gonçalves, H., & Graça, J. M. (2004). *Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal*.
- [34] Feriadi, Henry & Wong, N.H (2004) Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia, *Energy and Buildings*
- [35] Busch, John F. (1992) *A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand*, Volume 18, Issues 3–4 Pages 235-249
- [36] Ealiwa et al., (2001), *An investigation into thermal comfort in the summer season of Ghadames, Libya*, Volume 36, Issue 2, Pages 231-237
- [37] de Dear and Brager, (2002), Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55, Volume 34, Issue 6, Pages 549-561
- [38] ( Qi Jie Kwong *et al* Q.J. Kwaong and N.M. Adam, ‘*Thermal Comfort in Enclosed Lift Lobby of a Tropical Educational Institution*’, *Thammasat International Journal of Science and Technology*, Vol. 15, N°3, pp. 8 – 18, 2010.).
- [39] Nuno M. Mateus *et al*, (2016), *Comparison of measured and simulated performance of natural displacement ventilation systems for classrooms*, *Energy and Buildings*, Vol. 133, pp 185-196