

Charif Hicham Reda

Melhoria do desempenho energético de edifícios através de técnicas de arrefecimento passivo – caso de estudo do campus Pato Branco da Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dissertação de Mestrado

Engenharia de Construção e Reabilitação

Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos F. de Almeida

Professor Doutor José Ilo Pereira Filho



RESUMO

A qualidade dos edifícios educacionais está diretamente ligada com o grau de satisfação dos seus ocupantes em relação ao conforto térmico. Esta qualidade deve ser preservada, principalmente nas salas de aula, em que os níveis de conforto térmico devem ser adequados a fim de assegurar que os estudantes se sintam satisfeitos, garantindo-se assim as condições necessárias para um adequado desempenho acadêmico.

No presente trabalho pretende-se realizar a avaliação das condições de conforto térmico no interior das salas de aula de um edifício universitário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, localizado no campus da cidade de Pato Branco no Brasil, e testar a eficácia de diferentes estratégias de arrefecimento passivo com o objetivo de melhorar o conforto térmico das salas de aula. Para tal, é utilizado um programa de simulação térmica em regime dinâmico, o *DesignBuilder*.

Inicialmente foi realizada a modelação do caso de estudo com base em informações de projetos cedidos pela própria universidade e em seguida foram realizadas quatro simulações relativas ao estado atual da edificação.

A partir dos resultados das simulações, foi realizada a avaliação do conforto térmico utilizando o modelo proposto pela EN 15251, concluindo-se que as salas de aula não apresentam níveis adequados de conforto térmico, manifestando longos períodos caracterizados por desconforto por sobreaquecimento.

Após este estudo, foram realizadas outras nove simulações de cenários com intervenções para tentar minimizar este desconforto. Quatro destes cenários incluíam isoladamente estratégias de arrefecimento passivo, nomeadamente: ventilação natural, cobertura verde e pintura refletante. As cinco simulações restantes eram compostas por combinações variadas entre as estratégias anteriores.

De forma sintética, o estudo permitiu concluir que, para as condições apresentadas neste caso de estudo, a estratégia de arrefecimento passivo mais eficiente é a ventilação natural, porém não causa grandes impactos quando utilizada de forma isolada. A melhoria significativa do conforto térmico só foi alcançada através da utilização de duas ou mais estratégias combinadas.

ABSTRACT

The quality of educational buildings is directly linked to the degree of satisfaction of its occupants in relation to thermal comfort. This quality must be preserved, especially in classrooms, where the levels of thermal comfort must be suitable to ensure that students feel satisfied, thus guaranteeing the necessary conditions for adequate academic performance.

The present work intends to evaluate the thermal comfort conditions inside the classrooms of a university building at the Federal Technological University of Paraná, located on the campus of Pato Branco, Brazil, and to test the effectiveness of different strategies of passive cooling to improve the thermal comfort of the classrooms. For that, a dynamic thermal simulation software, DesignBuilder, is used.

Initially, the case study was modeled based on project information provided by the university itself, and then four simulations were carried out regarding the current state of the building.

Based on the results of the simulations, the evaluation of thermal comfort was performed using the model proposed by EN 15251. In conclusion, the classrooms do not have adequate levels of thermal comfort, showing long periods characterized by discomfort due to overheating.

After this study, nine other scenario simulations were carried out with interventions to try to minimize this discomfort. Four of these scenarios included passive cooling strategies in isolation, namely natural ventilation, green roof, and reflective paint. The remaining five simulations were composed of varied combinations between the previous strategies.

In summary, the study allowed us to conclude that, for the conditions presented in this case study, the most efficient passive cooling strategy is natural ventilation, but it does not cause great impacts when used in isolation. The significant improvement in thermal comfort was only achieved through the use of two or more combined strategies.

PALAVRAS CHAVE

Arrefecimento passivo

Conforto térmico

Edifícios educacionais

Ventilação natural

Cobertura verde

Pintura refletante

KEY WORDS

Passive cooling
Thermal comfort
Educational buildings
Natural ventilation
Green roof
Reflective painting

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento da presente dissertação só foi possível devido à contribuição e apoio de todas as pessoas que de uma forma direta ou indireta demonstraram seu contributo, às quais desejo manifestar o meu profundo e sincero agradecimento:

Ao meu orientador, Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, por todo o apoio prestado, pela disponibilidade, motivação, tempo despendido, confiança, dedicação e pela partilha de conhecimentos e sugestões ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho.

Ao meu coorientador, Professor Doutor José Ilo Pereira Filho, pela disponibilidade, confiança e pela partilha de conhecimentos.

Ao Professor Doutor Gustavo Lacerda Dias, pela disponibilização de informações sobre o caso de estudo e todo apoio prestado durante a realização deste mestrado.

À minha família, desejo um agradecimento muito especial, fundamentalmente aos meus pais, ao meu irmão e minha namorada, pelo apoio e incentivo prestado, pois sem eles nada disto teria sido possível.

A todos os meus amigos que me acompanharam ao longo do percurso académico no Instituto Politécnico de Viseu, em especial Eduardo Henrique Nunes da Silva, por toda a ajuda prestada.

A todos, o meu muito obrigado!

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE TABELAS	xxi
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objetivo do trabalho	2
1.3 Organização e estrutura do trabalho	2
2. Estado da arte.....	4
2.1 Arrefecimento passivo	4
2.2 Conforto térmico.....	5
2.2.1 Modelo analítico da ISO 7730: PMV/PPD	6
2.2.2 Modelo adaptativo	8
2.3 Estratégias de arrefecimento passivo	10
2.3.1 Arrefecimento por radiação	10
2.3.2 Arrefecimento evaporativo	12
2.3.3 Ventilação de conforto.....	16
2.3.4 Ventilação noturna.....	16
2.3.5 Materiais de mudança de fase (PCM).....	19
2.3.6 Arrefecimento utilizando o solo	20
2.3.7 Sombreamento	22
3. Metodologia.....	24
3.1 Simulação térmica e energética	24
3.1.1 <i>EnergyPlus</i>	24
3.1.2 <i>DesignBuilder</i>	25
3.2 Caso de estudo	25
3.2.1 Localização e caracterização do edifício	25
3.2.2 Dados climáticos	30

3.2.3	Elementos Construtivos	31
3.3	Modelo de Simulação	38
3.3.1	Geometria.....	38
3.3.2	Ganhos internos.....	40
3.3.3	Ventilação	41
3.3.4	Proteção solar.....	41
3.4	Simulação do cenário atual e das estratégias de arrefecimento passivo.....	41
3.4.1	Considerações iniciais.....	41
3.4.2	Ventilação natural	42
3.4.3	Cobertura verde.....	43
3.4.4	Pintura refletiva.....	43
3.5	Avaliação do conforto térmico	44
4.	Apresentação e discussão dos resultados	46
4.1	Considerações iniciais	46
4.2	Simulações do edifício existente	47
4.2.1	Simulação S0.1.....	47
4.2.2	Simulação S0.2.....	51
4.2.3	Simulação S0.3.....	53
4.2.4	Simulação S0.4.....	55
4.3	Simulações do edifício com as estratégias de arrefecimento passivo	57
4.3.1	Simulação S1.....	57
4.3.2	Simulação S2.....	59
4.3.3	Simulação S3.....	62
4.3.4	Simulação S4.....	64
4.3.5	Simulação S5.....	66
4.3.6	Simulação S6.....	68
4.3.7	Simulação S7.....	70
4.3.8	Simulação S8.1.....	72
4.3.9	Simulação S8.2.....	74
4.4	Discussão dos resultados	77
5.	Conclusões	80
5.1	Conclusões gerais	80

5.2	Desenvolvimentos futuros	82
	Referências	84
	Anexo 1- Avaliação do conforto térmico segundo a NORMA EN 15251	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Gráfico do PPD em função do PMV, adaptado de [7]	7
Figura 2-2: Gráfico da zona de conforto para edifícios naturalmente ventilados, adaptado de [12]	9
Figura 2-3: Fluxo de luz solar atingindo uma cobertura convencional (esquerda) e uma cobertura fria (direita) [15]	11
Figura 2-4: Arrefecimento por radiação [16]	11
Figura 2-5: Torre de arrefecimento evaporativo [16]	12
Figura 2-6: Arrefecimento evaporativo através de água na cobertura [16]	13
Figura 2-7: Arrefecimento evaporativo através de cobertura verde [16]	14
Figura 2-8: Ventilação cruzada [16]	16
Figura 2-9: Sistema de ventilação noturna [16]	17
Figura 2-10: Torre de vento [16]	17
Figura 2-11: Esquema representativo do comportamento térmico do PCM microencapsulado, adaptado de [36]	19
Figura 2-12: Sistema arrefecimento através de tubos enterrados (ar), adaptado de [42]	21
Figura 2-13: Proteção solar através do sombreamento da edificação [16]	22
Figura 3-1: Localização de Pato Branco, adaptado de [52]	26
Figura 3-2: Localização do edifício em estudo (bloco M), adaptado de [53]	26
Figura 3-3: Vista frontal (esquerda) e vista posterior (direita) do bloco M	27
Figura 3-4: Interior da Sala de Aula 2PP	27
Figura 3-5: Plantas baixas dos dois pavimentos da edificação	29
Figura 3-6: Gráfico da temperatura média mensal em Novo Horizonte – SC, adaptado de [55]	30
Figura 3-7: Gráfico da radiação média mensal em Novo Horizonte – SC, adaptado de [55] ..	31
Figura 3-8: Pormenor da constituição da parede externa tipo E1	31
Figura 3-9: Pormenor da constituição da parede externa tipo E2	32
Figura 3-10: Pormenor da constituição da parede externa tipo E3	32
Figura 3-11: Pormenor da constituição da parede interna tipo I1	33
Figura 3-12: Pormenor da constituição da parede interna tipo I2	33
Figura 3-13: Pormenor da constituição do pavimento térreo	34
Figura 3-14: Pormenor da constituição do pavimento intermediário - salas de aula e circulação	35
Figura 3-15: Pormenor da constituição do pavimento intermediário das instalações sanitárias	35
Figura 3-16: Pormenor da constituição da cobertura – salas de aula e circulação	36
Figura 3-17: Pormenor da constituição da cobertura das instalações sanitárias	36
Figura 3-18: Vistas 3D da modelação do bloco M	38

Figura 3-19: Plantas da edificação divididas em zonas, a) pavimento térreo e b) primeiro pavimento.....	39
Figura 3-20: Modelação 3D das salas de aula em estudo	39
Figura 4-1: Temperatura do ar nas salas de aula do pavimento térreo e do primeiro pavimento: a) sala de aula 1PT/PP, b) sala de aula 2PT/PP e c) sala de aula 3PT/PP.....	47
Figura 4-2: <i>Boxplot</i> da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S0.1	48
Figura 4-3: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para a sala de aula 1PT (esquerda) e sala de aula 1PP (direita) – simulação S0.1.....	48
Figura 4-4: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para a sala de aula 2PT (esquerda) e sala de aula 2PP (direita) – simulação S0.1.....	49
Figura 4-5: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para a sala de aula 3PT (esquerda) e sala de aula 3PP (direita) – simulação S0.1.....	49
Figura 4-6: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.1	49
Figura 4-7: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.1	50
Figura 4-8: <i>Boxplot</i> da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S0.2	51
Figura 4-9: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.2	51
Figura 4-10: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.2.....	52
Figura 4-11: <i>Boxplot</i> da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S0.3 ..	53
Figura 4-12: Percentagem de desconforto térmico por hora em cada sala de aula na simulação S0.3	53
Figura 4-13: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.3.....	54
Figura 4-14: <i>Boxplot</i> da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S0.4 ..	55
Figura 4-15: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.4 ..	55
Figura 4-16: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.4.....	56
Figura 4-17: <i>Boxplot</i> da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S1	57
Figura 4-18: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S1	58
Figura 4-19: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S1	58
Figura 4-20: <i>Boxplot</i> da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S2	59
Figura 4-21: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S2	60
Figura 4-22: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S2.....	60
Figura 4-23: <i>Boxplot</i> da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S3	62
Figura 4-24: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S3	62
Figura 4-25: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S3.....	63
Figura 4-26: <i>Boxplot</i> da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S4	64
Figura 4-27: Percentagem de desconforto térmico por hora em cada sala de aula na simulação S4	64
Figura 4-28: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S4.....	65
Figura 4-29: <i>Boxplot</i> da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S5	66
Figura 4-30: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S5	66
Figura 4-31: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S5.....	67
Figura 4-32: <i>Boxplot</i> da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S6	68

Figura 4-33: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S6.....	68
Figura 4-34: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S6	69
Figura 4-35: <i>Boxplot</i> da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S7.....	70
Figura 4-36: Percentagem de desconforto térmico cada sala de aula na simulação S7.....	70
Figura 4-37: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S7	71
Figura 4-38: <i>Boxplot</i> da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S8.1...	72
Figura 4-39: Percentagem de desconforto térmico por hora em cada sala de aula na simulação S8.1	72
Figura 4-40: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S8.1	73
Figura 4-41: <i>Boxplot</i> da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S8.2...	74
Figura 4-42: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para a sala de aula 1PT (esquerda) e sala de aula 1PP (direita) – simulação S8.2	74
Figura 4-43: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para a sala de aula 2PT (esquerda) e sala de aula 2PP (direita) – simulação S8.2	75
Figura 4-44: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para a sala de aula 3PT (esquerda) e sala de aula 3PP (direita) – simulação S8.2	75
Figura 4-45: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S8.2...	75
Figura 4-46: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S8.2	76
Figura 4-47: Variação horária da temperatura do ar interna na Sala de Aula 3PP para as simulações do edifício existente	78
Figura 4-48: Variação horária da temperatura do ar interna na Sala de Aula 3PP para as simulações do edifício a) com as estratégias de arrefecimento e b) com as combinações de estratégias	78
Figura 4-49: Diferença da temperatura do ar interna entre a simulação S0.1 e as simulações a) das estratégias de arrefecimento e b) das combinações entre as estratégias	79

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1: Escala de sensação térmica de sete níveis, adaptado de [7]	7
Tabela 2-2: Categorias de ambiente térmico, adaptado de [7]	8
Tabela 3-1: Portas referentes aos dois pavimentos da edificação	37
Tabela 3-2: Janelas referentes aos dois pavimentos da edificação	37
Tabela 3-3: Resumo das propriedades dos materiais constituintes dos elementos construtivos	38
Tabela 3-4: Densidade de pessoas por metro quadrado em cada sala de aula.....	40
Tabela 3-5: Parâmetros variáveis nas simulações	42
Tabela 3-6: Parâmetros de cálculo da cobertura verde que foi simulada no <i>DesignBuilder</i>	43
Tabela 3-7: Parâmetros alterados nos materiais para caracterizar a pintura refletiva	44
Tabela 4-1: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S0.1	50
Tabela 4-2: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S0.2.....	52
Tabela 4-3: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S0.3.....	54
Tabela 4-4: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S0.4.....	56
Tabela 4-5: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S1.....	59
Tabela 4-6: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S2.....	61
Tabela 4-7: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S3.....	63
Tabela 4-8: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S4.....	65
Tabela 4-9: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S5.....	67
Tabela 4-10: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S6.....	69
Tabela 4-11: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S7	71
Tabela 4-12: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S8.1	73
Tabela 4-13: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S8.2	76

1. Introdução

1.1 Enquadramento geral

Em climas quentes, as necessidades de energia para arrefecimento geralmente são as mais relevantes no balanço energético dos edifícios. Nesse contexto, utilizar estratégias de arrefecimento que operem de forma passiva é o método mais adequado para melhorar o conforto térmico dos ocupantes sem provocar o aumento dessas necessidades. Vários trabalhos têm evidenciado o potencial das técnicas de arrefecimento passivo, quer ao nível da diminuição do desconforto por sobreaquecimento, quer ao nível da redução das necessidades energéticas de arrefecimento, sempre sem condicionar significativamente o desempenho dos edifícios nos períodos mais frios.

No caso dos edifícios escolares, os ganhos internos associados às elevadas taxas de ocupação tornam as preocupações com o desconforto por sobreaquecimento e, portanto, as necessidades energéticas de arrefecimento, ainda mais relevantes. Adicionalmente, a densidade de ocupação das salas de aula impõe ainda preocupações acrescidas relacionadas com a admissão mínima de ar fresco necessária à garantia de uma adequada qualidade do ar interior. Esta ventilação pode, por outro lado, constituir uma oportunidade de melhoria das condições de conforto interior, se o seu funcionamento for devidamente ajustado.

Os programas de simulação térmica e energética em regime transiente, como o *EnergyPlus*, constituem uma ferramenta de grande potencial para a avaliação de eficácia de diferentes estratégias de intervenção num edifício com o objetivo de melhorar o seu desempenho térmico.

1.2 Objetivo do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é avaliar as condições de conforto térmico no interior das salas de aula de um edifício universitário, nomeadamente ao nível do desconforto por sobreaquecimento, e testar a eficácia de diferentes estratégias de arrefecimento passivo a fim de melhorar o desempenho térmico das salas de aula. Para concretizar tal objetivo estabeleceram-se alguns objetivos específicos para conduzir o trabalho ao destino proposto. Estes objetivos específicos são:

- Avaliar o desempenho térmico do edifício em seu estado atual através de simulações computacionais em regime dinâmico;
- Avaliar a eficiência de diferentes estratégias de arrefecimento passivo na melhoria do conforto térmico no interior da edificação, também com recurso a simulações em regime dinâmico. Serão testadas as seguintes estratégias: ventilação natural, cobertura verde, pintura refletante e combinações entre elas.

1.3 Organização e estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em 5 capítulos distintos:

- No capítulo 1 é feita a apresentação do trabalho desenvolvido, mostrando o enquadramento geral do tema e os principais objetivos a serem alcançados;
- No capítulo 2 apresentam-se as noções base que suportam o trabalho desenvolvido, tais como: uma abordagem geral sobre conforto térmico e a caracterização e descrição dos parâmetros que regem a sua determinação e alguns métodos de avaliação do mesmo, além de uma descrição geral sobre arrefecimento passivo e descrição das principais estratégias utilizadas atualmente, juntamente com suas vantagens e desvantagens;
- No capítulo 3, inicialmente é apresentado o software de simulação utilizado e uma explicação geral sobre simulações térmicas e energéticas. Em seguida, é realizada a apresentação do caso de estudo e a caracterização do edifício e do clima. Por fim são descritos os parâmetros utilizados para a modelação e simulação do edifício existente e do edifício melhorado com as estratégias de arrefecimento passivo estudadas;
- No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados e análises das simulações realizadas no trabalho, nomeadamente as simulações do edifício no seu cenário atual, simulações utilizando as estratégias de arrefecimento e simulações com combinações variadas entre as estratégias;
- No capítulo 5, último capítulo da dissertação, apresentam-se as principais conclusões retiradas do presente trabalho, assim como algumas considerações para eventuais trabalhos futuros.

1 – Introdução

Além dos capítulos acima descritos, o estudo ainda conta um anexo referente à apresentação dos resultados da avaliação do conforto térmico a partir dos dados da simulação:

- Anexo 1 - Avaliação do conforto térmico utilizando a norma EN 15251.

2. Estado da arte

2.1 Arrefecimento passivo

Os métodos do arrefecimento passivo aplicados em edifícios objetivam conseguir algum conforto térmico de uma forma sustentável e econômica, pois esses métodos funcionam sem ou com um consumo mínimo de energia, elétrica ou combustível, causando um impacto direto no gasto mensal com energia e diminuindo drasticamente a emissão de dióxido de carbono (CO₂). Essas técnicas tomam proveito dos fenômenos naturais para alcançar o conforto térmico almejado, utilizando os ventos, a água, o solo e as propriedades dos materiais que acabam baixando significativamente a temperatura interna das edificações [1].

Nesse âmbito, pode-se comparar edifícios antigos (antes da generalização do uso do ar-condicionado) com os edifícios atuais. Analisando as duas construções sem nenhum tipo de arrefecimento ativo pode-se verificar que os edifícios antigos permanecem mais frescos, pois têm um design e escolha de materiais, do ponto de vista energético, mais eficientes que os novos [2].

Antigamente essa situação era pensada pelos arquitetos e engenheiros, costume que foi se perdendo depois do aparecimento do ar-condicionado e aprimoramento do padrão de vida da humanidade. Não era interessante utilizar o arrefecimento passivo se uma máquina elétrica poderia facilmente fazer isso em poucos minutos [2].

Entretanto, nos últimos anos esse conceito voltou a tomar força, impulsionado pela preocupação com a sustentabilidade e justificado pelo consumo de energia ligado ao setor dos edifícios que corresponde a cerca de 30 a 45% da demanda de energia global [3].

2.2 Conforto térmico

Segundo a norma Americana ASHRAE 55 [4], o conforto térmico é uma condição mental que expressa satisfação do ser humano com o ambiente térmico em que está inserido. A satisfação varia de pessoa para pessoa, portanto quantificar um ambiente habitado por muitas pessoas demanda alguma complexidade. Desta maneira um ambiente confortável deve propiciar conforto ao maior número de pessoas possível e não para todas que o frequentam.

O autor Álvaro César Ruas [5] menciona em sua dissertação que a sensação de conforto está atrelada a seis fatores variáveis que interferem no sistema termorregulador do ser humano, são eles: temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade relativa do ar, umidade relativa, taxa de metabolismo e isolamento térmico propiciado pela vestimenta das pessoas. Desta forma, os quatros primeiros fatores estão relacionados com o ambiente e os dois últimos com as características individuais das pessoas. Estes constituem os parâmetros físicos, porém estudos mais recentes consideram também os parâmetros psicossociais, que julgam necessário o estudo de características comportamentais, fisiológicas e psicológicas dos indivíduos.

As variáveis ambientais dependem das características termo-climáticas do ambiente. Os materiais e métodos construtivos utilizados na concepção da envolvente e condições climáticas no local onde se encontra o edifício têm grande influência na determinação dos parâmetros ambientais. A norma internacional ISO-7726 (1998) [6] define esses parâmetros e refere como podem ser medidos.

No contexto das variáveis individuais, é importante compreender que o ser humano é um animal homeotérmico, ou seja, seu organismo é regulado involuntariamente para se manter com uma temperatura interna aproximadamente constante que garanta sua sobrevivência. O corpo humano realiza processos químicos, para produzir energia e manter a temperatura interna, através da queima de calorias provenientes da ingestão de alimentos [5]. Esse processo que transforma as calorias em energia é chamado de metabolismo.

A taxa de metabolismo é definida pela ASHRAE 55 [4] como taxa de transformação da energia química em calor e trabalho mecânico por atividades metabólicas dentro de um organismo. Esse fator deve ser estudado pois muda com a atividade física que a pessoa está realizando, por exemplo: em uma sala de aula, o professor que está em pé explicando a matéria tem uma taxa de metabolismo mais alta do que os alunos que estão apenas sentados assistindo a aula.

A outra variável individual é o isolamento térmico propiciado pela vestimenta. As roupas que as pessoas utilizam em seu dia a dia servem como uma barreira térmica, fazendo com que o corpo perca menos calor para o ambiente.

A norma internacional ISO-7730 (2005) [7] disponibiliza tabelas com diferentes combinações de vestimentas e estabelece também a taxa de metabolismo para inúmeras atividades físicas

possíveis em diferentes tipos de ambientes. Essas tabelas podem ser obtidas nos anexos B e C da referida norma, respectivamente.

Os parâmetros psicossociais assumem a premissa de que o homem pode interagir fisicamente e psicologicamente com o ambiente térmico em que está inserido. Essa interação tem caráter sociocultural e psicológica, e faz com que experiências passadas e estímulos sensoriais afetem a zona térmica confortável para cada indivíduo. Além disso, o indivíduo pode assumir uma postura de controle sobre o seu conforto, realizando adaptações que melhoram o seu contentamento com o ambiente térmico.

Estudos realizados por [8] demonstram que quando o indivíduo sente algum desconforto em relação ao ambiente térmico, costuma praticar ajustamentos para atingir a satisfação térmica, como por exemplo: retirar ou colocar peças de roupa, consumir bebidas (quentes ou geladas), abrir ou fechar janelas e gerenciar dispositivos de sombreamento.

Esses parâmetros são divididos em três formas de adaptação ao ambiente: comportamentais (ajustamentos feitos pelo indivíduo para garantir o equilíbrio térmico), fisiológicas (capacidade do organismo se ajustar às condições térmicas) e psicológicas (idade, gênero, cultura, expectativas, experiência) [9]. Estes parâmetros têm grande importância na caracterização da zona de conforto térmico, mas são considerados apenas nos modelos adaptativos de conforto, pois a sua significativa influência foi descoberta posteriormente aos estudos de Fanger [10], que deram origem ao modelo PMV (*Predicted Percentage Dissatisfied*). Os dois modelos são descritos sucintamente nas próximas subseções desta dissertação.

2.2.1 Modelo analítico da ISO 7730: PMV/PPD

O *Predicted Mean Vote* (PMV) é um índice de previsão do voto médio de um grupo de pessoas de diferentes nacionalidades, idades e sexos, com base em parâmetros higrotérmicos (temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e pressão parcial do vapor de água), da resistência térmica da vestimenta e da atividade metabólica para quantificar a sensação térmica em um ambiente [7].

Este índice leva em consideração as propriedades termofisiológicas do homem e seu equilíbrio térmico com o meio ambiente, mas não considera a variação fisiológica e os efeitos psicológicos no modelo. O índice é apresentado e regulamentado pela norma internacional ISO-7730 [7]. A Tabela 2-1 apresenta a escala com sete níveis utilizada pela norma para quantificar o conforto térmico em termos do PMV.

Tabela 2-1: Escala de sensação térmica de sete níveis, adaptado de [7]

+3	Muito Quente
+2	Quente
+1	Ligeiramente Quente
0	Neutro
-1	Ligeiramente Frio
-2	Frio
-3	Muito Frio

Porém esta abordagem não contempla uma sensação de conforto térmico de cada indivíduo que utiliza o espaço, pelo fato de prever os votos médios e não individuais de cada um. Desta maneira pode-se utilizar o índice *Predicted Percentage Dissatisfied* (PPD), que estabelece uma previsão quantitativa da porcentagem de pessoas que consideram o ambiente desconfortável termicamente. Esse índice é calculado a partir dos resultados do índice PMV. A Figura 2-1 mostra um gráfico do PPD em função do PMV.

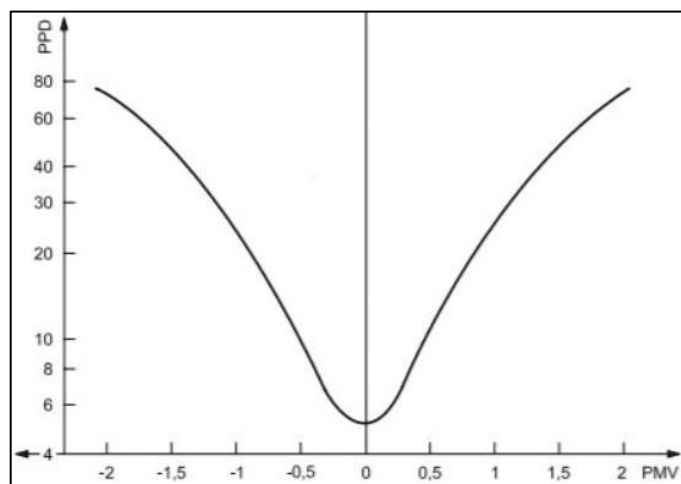


Figura 2-1: Gráfico do PPD em função do PMV, adaptado de [7]

Os métodos e parâmetros para calcular os índices PMV e PPD estão apresentados na norma ISO 7730. A norma recomenda que o índice PMV só seja usado para valores dentro do intervalo de -2 (sensação de frio) até +2 (sensação de calor) e destaca algumas limitações no uso deste modelo para os mínimos e máximos valores das variáveis utilizadas para calcular o conforto. Estas recomendações são as seguintes:

- $M = 46$ a 232 W/m²;
- $I_{cl} = 0$ a $0,310$ (m². K) /W;
- $T_a = 10$ a 30 °C;
- $T_{mr} = 10$ a 40 °C;
- $V_{ar} = 0$ a 1 m/s;
- $P_a = 0$ a 2700 Pa.

Esses índices são utilizados como valores de referência para garantir condições de conforto térmico em um ambiente, que pode ser classificado em três categorias (A, B e C) segundo o anexo A da norma ISO 7730. A Tabela 2-2 mostra essa classificação em termos dos limites admissíveis para os índices PMV e PPD.

Tabela 2-2: Categorias de ambiente térmico, adaptado de [7]

Categoria	Estado térmico global do corpo	
	PPD (%)	PMV
A	< 6	-0,2 < +0,2
B	< 10	-0,5 < +0,5
C	< 15	-0,7 < +0,7

2.2.2 Modelo adaptativo

Os modelos adaptativos sugerem uma correlação entre a temperatura do ambiente exterior e a temperatura do ambiente interior de uma edificação, pois consideram que o homem pode se adaptar a diferentes climas e variações sazonais dependendo do local onde reside. Consequentemente o modelo de conforto adaptativo é baseado, além dos fatores físicos e fisiológicos, na expectativa e preferências térmicas dos ocupantes das edificações [11].

Segundo a norma europeia EN 15251 (2006) [12] essa adaptação dos ocupantes pode ser definida como um ajuste psicológico, fisiológico ou comportamental dos ocupantes do edifício à térmica interna ambiente para evitar o desconforto. Essa abordagem, quando referente a edifícios com ventilação natural, é frequentemente relacionada com as mudanças no ambiente interno induzidas pelas condições climáticas do ambiente externo.

A EN 15251 concretiza essa abordagem adaptativa apresentando uma zona de temperaturas de conforto para edificações sem sistemas de arrefecimento mecânico, ocupadas por pessoas que praticam atividades sedentárias e que demonstram facilidade de adaptação às condições ambientais, calculada a partir da correlação entre a temperatura operativa e a temperatura

exterior média exponencialmente ponderada (T_{mp}), esse processo leva em consideração a experiência do usuário durante a semana anterior ao dia em análise, considerando diferentes pesos para cada dia. A equação que permite calcular a T_{mp} é apresentada na Equação 2-1.

$$T_{mp} = \frac{T_{n-1}+0,8 \cdot T_{n-2}+0,6 \cdot T_{n-3}+0,5 \cdot T_{n-4}+0,4 \cdot T_{n-5}+0,3 \cdot T_{n-6}+0,2 \cdot T_{n-7}}{3,8} \quad (2-1)$$

Em que:

T_{mp} (°C) Temperatura exterior média exponencialmente ponderada

T_{n-i} (°C) Temperatura média exterior do dia (i) anterior

A norma baseou-se em pesquisas de conforto em edifícios reais, ventilados naturalmente, e abrange a temática do conforto adaptativo estabelecendo critérios para o conforto térmico em edificações em três categorias, dependendo do nível de expectativa dos ocupantes. A primeira considera um alto nível de expectativa e é aconselhada para pessoas sensíveis e frágeis, a segunda considera um nível médio de expectativa e é recomendada para ser usada em edificações novas e reformas. Por fim, a terceira categoria deve ser adotada para edificações existentes. A Figura 2-2 demonstra os limites superiores e inferiores de aceitabilidade para as três categorias na estação de arrefecimento.

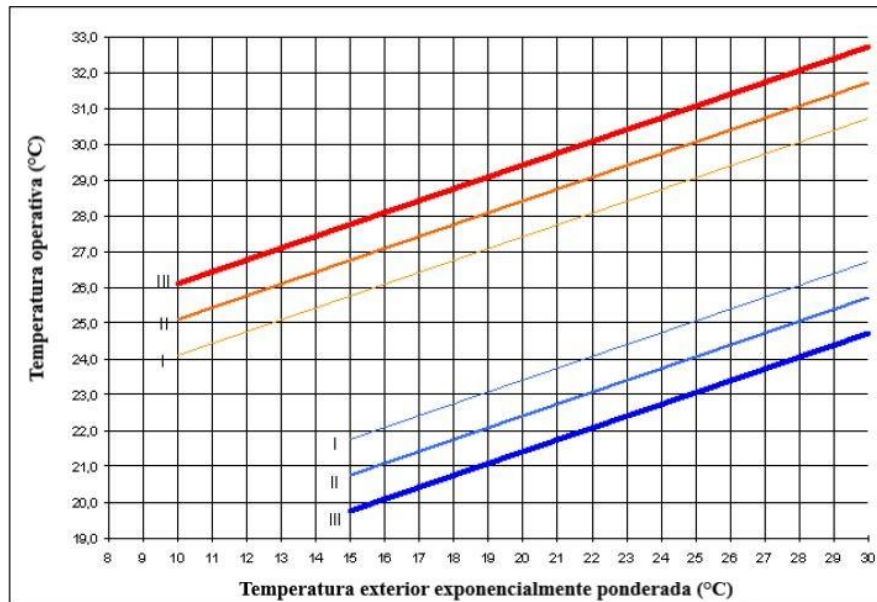


Figura 2-2: Gráfico da zona de conforto para edifícios naturalmente ventilados, adaptado de [12]

2.3 Estratégias de arrefecimento passivo

O arrefecimento passivo é atingido através de estratégias para controle solar e de calor, amortização e dissipação do calor. Portanto um edifício projetado segundo conceitos de arrefecimento passivo é pensado para ter eficiência na prevenção de ganhos de calor, modulação de ganhos de calor (capacidade de armazenamento térmico da estrutura do edifício) e dissipação do calor adquirido durante o dia [3].

O excesso de calor é libertado para o ambiente para diminuir a temperatura interna da edificação e dessa forma melhorar a sensação de conforto térmico dos usuários. As estratégias mais eficientes utilizam o solo, a água, o ar ambiente e o céu como dissipadores.

2.3.1 Arrefecimento por radiação

O arrefecimento por radiação pretende diminuir o ganho de calor nos edifícios, por meio da eliminação do excesso de calor adquirido durante o dia (ensolarado) e pode ser conseguido por dois métodos: o arrefecimento refletivo e o arrefecimento radiante.

O primeiro está relacionado com a restrição considerável da energia emanada pelo sol por meio da sua reflexão, utilizando pintura com cores refletivas nas coberturas e fachadas. A técnica mais utilizada são as chamadas coberturas frias. Essa técnica utiliza a alta refletância solar e alta emissividade no infra-vermelho para conseguir melhorar o conforto térmico de espaços sem ar condicionado, contribuindo simultaneamente para o aumento da vida útil do telhado (reduzindo a temperatura operacional do mesmo) e para a redução do consumo de energia [13].

O estudo realizado pelo autor do artigo [14] refere uma redução da temperatura média da superfície externa da cobertura em mais de 10 °C, para um clima moderado, com forte impacto quando a edificação está sujeita a temperaturas mais altas. O artigo foi baseado em um caso de estudo na França, no qual o autor analisou simulações e medições no local de um apartamento duplex em um edifício na parte central do país.

As coberturas frias são, na maioria das vezes, brancas e utilizam acabamentos à base de produtos líquidos, como: tintas, revestimentos acrílicos, poliuretano e elastoméricos. Utilizando os melhores produtos, em climas tropicais, pode-se reduzir consideravelmente o ganho de calor, refletindo cerca de 90% da radiação solar que o edifício ficará sujeito. Em contrapartida deve-se manter atento e realizar manutenções periódicas, pois as coberturas frias perdem sua refletância com o passar do tempo devido à acumulação de sujeira na superfície. A eficiência dessa técnica está restrita aos meses quentes e não deve ser utilizada em áreas próximas de rotas de voo porque pode causar desconforto visual [13]. A Figura 2-3 apresenta a uma ilustração que mostra o fluxo de energia da luz solar atingindo uma cobertura convencional e uma cobertura fria.

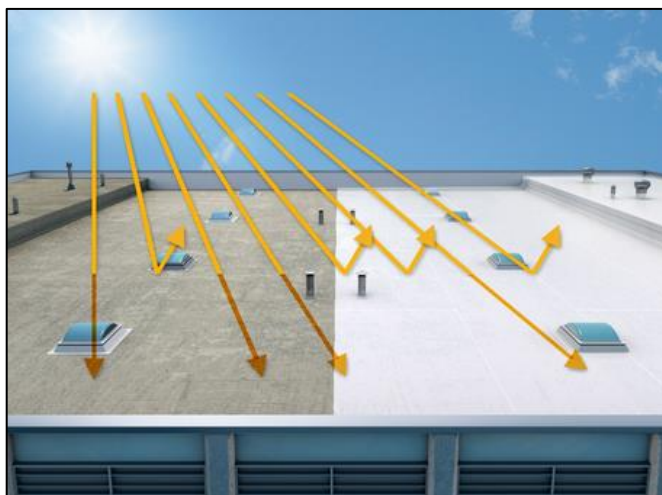


Figura 2-3: Fluxo de luz solar atingindo uma cobertura convencional (esquerda) e uma cobertura fria (direita) [15]

Tintas e revestimentos com alta refletância também podem ser utilizados como protetores de ganhos solares em fachadas. Porém, devido a grande exposição delas, deve-se realizar um estudo prévio para evitar que essa técnica gere desconforto visual ou dano ao design arquitetônico da edificação.

O arrefecimento radiante funciona de forma a que a cobertura absorve o calor do interior da edificação durante o dia e o liberte à noite para o ambiente externo. Esse processo funciona segundo o princípio de que o calor flui das superfícies mais quentes para as mais frias na forma de radiação de ondas eletromagnéticas longas. Desta maneira a eficácia desta técnica está condicionada pelas condições atmosféricas do ambiente (nuvens e umidade relativa) [13]. Esta técnica pode ser potencializada utilizando um sistema móvel de isolamento térmico ou proteção solar (sombreamentos) na cobertura, para que os ganhos solares sejam mitigados. O desenho esquemático do arrefecimento radiante é ilustrado na Figura 2-4.

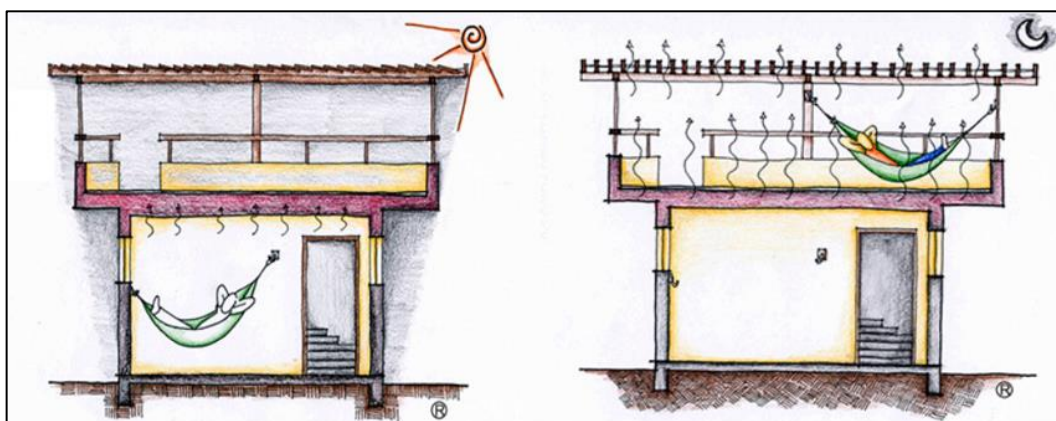


Figura 2-4: Arrefecimento por radiação [16]

2.3.2 Arrefecimento evaporativo

O processo de arrefecimento evaporativo acontece por meio da alteração do estado físico da água, quando passa da forma líquida para a forma de vapor através do seu aquecimento oriundo de algum tipo de energia. Esse fenómeno pode ser observado facilmente na natureza (acima de lagos, oceanos e folhagens densas) ou até na própria pele humana [17].

Esta estratégia é muito utilizada para arrefecimento passivo do ambiente interno. O movimento do ar sobre uma superfície úmida faz com que uma parte da água evapore, reduzindo a temperatura e aumentando o teor de vapor no ar. Os dois tipos de arrefecimento mais básicos são: o arrefecimento evaporativo direto e o arrefecimento evaporativo indireto. Enquanto o primeiro reduz a temperatura e aumenta o teor de umidade do ambiente, o segundo é realizado através de uma troca de calor que mantém o ar úmido e fresco separado do ambiente, arrefecendo sem causar acréscimo da umidade do ar [3].

O arrefecimento evaporativo direto é a forma mais simples e antiga para arrefecer ambientes. O processo consiste na diminuição da temperatura do ar exterior que passa por uma “almofada umedecida” quando entra no ambiente, aumentando a umidade absoluta. Esse tipo de arrefecimento é simples e barato, tornando comum a sua utilização em aplicações residenciais [18].

Em locais com climas secos e áridos o arrefecimento evaporativo direto tem maior eficiência, pois além de resfriar o ar ainda pode umidificá-lo [3]. Um exemplo deste método é a torre de arrefecimento evaporativo (Figura 2-5), que funciona quando o ar é arrefecido no momento que entra na edificação pelo topo das torres através de aberturas cobertas com painéis umedecidos. À medida que o ar é arrefecido ele desce e passa pelo ambiente interno deixando-o mais confortável.

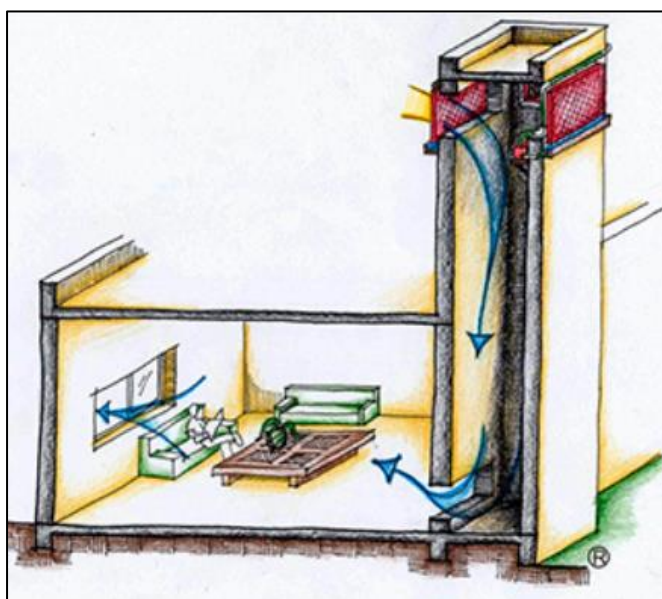


Figura 2-5: Torre de arrefecimento evaporativo [16]

Para atingir uma temperatura interna agradável em locais característicos de climas quentes e úmidos a estratégia do arrefecimento evaporativo indireto é considerada uma boa opção. Nestas regiões as flutuações da temperatura externa são baixas e a umidade é consideravelmente alta [18].

O sistema consiste em aproveitar a evaporação da água para arrefecer uma parte do edifício. Isso faz com que a técnica não interfira na umidade interior [19]. Os métodos mais correntes utilizados na atualidade são: as coberturas verdes, paredes de água e reservatórios de água na cobertura, que podem ser também pequenos lagos ou piscinas. A Figura 2-6 apresenta um desenho esquemático do arrefecimento evaporativo através de água na cobertura.

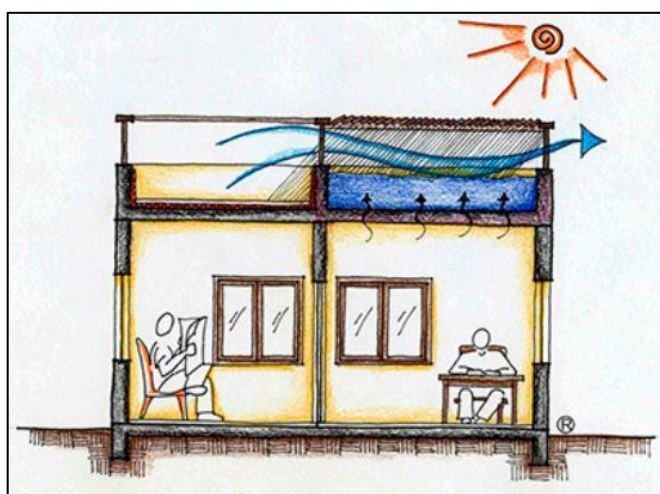


Figura 2-6: Arrefecimento evaporativo através de água na cobertura [16]

O estudo apresentado em [20] teve como objetivo avaliar a eficiência de um sistema de arrefecimento evaporativo indireto nos climas do Brasil, usando uma moradia de 87 m² como caso de estudo. A construção consistia em uma estrutura de betão armado com uma cobertura à base de vigas e elementos pré-fabricados em betão leve, com um teto-reservatório de água com aproximadamente 4 centímetros de espessura apoiado sobre uma lâmina metálica coberta por uma película de polietileno na cobertura. A lâmina de água ficava exposta a um fluxo de ar controlado por um pequeno extrator que auxiliou o processo evaporativo.

A partir dos resultados da monitorização da moradia experimental e utilizando equações preditivas, desenvolvidas e avaliadas em estudos prévios, aplicadas à base de dados de 411 cidades brasileiras distribuídas por todo o país, concluiu-se que o método apresenta grande aplicabilidade e eficiência no Brasil, podendo ser capaz de reduzir o desconforto térmico entre 95% e 100%, através de uma diminuição das temperaturas médias internas de até 2,5 °C. Tais reduções dependem fundamentalmente da diferença entre a temperatura de bulbo seco e a de bulbo úmido, ou seja, da quantidade de vapor de água existente no ar.

O estudo [21] também avalia a eficiência de um sistema passivo de arrefecimento evaporativo indireto. O autor utilizou 2 células-teste em escala reduzida que foram monitoradas e comparadas em relação aos dados obtidos. A diferença entre as células está na cobertura, enquanto o módulo de controle foi coberto por uma chapa de compensado naval com 15 mm de espessura mais 150 mm de poliestireno expandido, o módulo experimental era composto por uma cobertura estanque dotada de um reservatório de água. A experimentação decorreu no Brasil, na cidade de Curitiba, capital do estado do Paraná. Os resultados demonstraram grande efetividade do sistema num período relativamente seco da primavera curitibana e para um verão relativamente quente e úmido. Ficou evidente que a evaporação da água na cobertura do módulo experimental contribuiu para uma redução da temperatura do ar interna, reduzindo-a, em média, 2,5 °C.

No âmbito do arrefecimento evaporativo indireto, também existem as coberturas verdes, as quais evitam que a radiação solar incidente atinja a estrutura do edifício, além de oferecer um isolamento adicional. Estudos correntes nos últimos anos demonstraram que as coberturas verdes podem oferecer benefícios na redução da demanda de aquecimento no período de inverno, assim como no arrefecimento no verão [22].

As maiores aplicações desses sistemas dão-se em coberturas de edifícios (habitáveis ou não) e possibilitam diversas vantagens, de caráter econômico, ambiental, estético, social e de conforto térmico [23].

As coberturas verdes (Figura 2-7) podem ser definidas como a cobertura total ou parcial de um edifício, por vegetação. Este sistema é dividido em camadas, nomeadamente: uma membrana impermeabilizante, meio de crescimento (substrato) e a própria camada de vegetação. O sistema também prevê uma camada de barreira de raiz, uma camada de drenagem e, quando o clima exige, um sistema de irrigação [22].

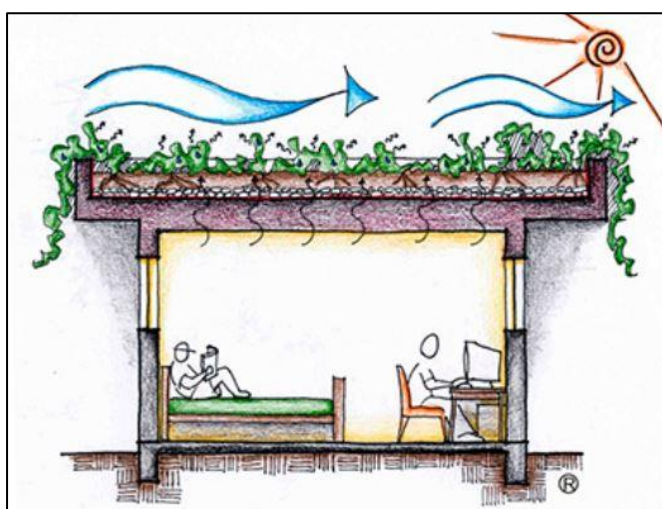


Figura 2-7: Arrefecimento evaporativo através de cobertura verde [16]

Atualmente, as coberturas verdes são divididas em duas classificações principais: intensiva e extensiva. Enquanto a primeira possui uma camada de substrato profunda com plantas e raízes maiores (arbustos e árvores), a segunda detém uma camada de substrato mais fina para plantio de sedum (plantas pequenas com grande capacidade de armazenar água) ou gramado e é muito leve, além de requerer uma manutenção mínima [22].

Um exemplo da utilização eficiente das coberturas verdes pode ser observado no estudo apresentado em [24], em que os autores realizaram uma comparação entre uma cobertura convencional e uma cobertura vegetal extensa irrigada, analisando o desempenho energético de uma moradia unifamiliar de aproximadamente 96 m² localizada em La Rochelle na França. Os dois sistemas foram comparados por meio de simulações dinâmicas executadas através do software TRNSYS. O clima do local é considerado temperado oceânico e a cobertura verde era em sedum plantado em um solo composto por uma mistura de 40% em materiais orgânicos e 60% em materiais vulcânicos (pozolana). Dentre os resultados que foram proporcionados pelo estudo o que mais interessa para o foco desta dissertação é o comportamento no verão quente, no qual a cobertura verde proporcionou uma redução de aproximadamente 2 °C nas temperaturas média e máxima do ar interno, demonstrando que esta técnica pode contribuir efetivamente para o conforto térmico no verão.

Um estudo realizado na Grécia, também demonstrou como o sistema pode ser eficiente para diminuir o custo com o arrefecimento de edificações. A análise foi executada em um edifício de dois pisos com uma pequena cave, com área total climatizada de 854,9 m², localizado em Atenas. Utilizando o software TRNSYS foram realizadas simulações admitindo o edifício: (a) com isolamento e com sistema de cobertura verde, (b) com isolamento e sem o sistema de cobertura verde, (c) sem isolamento e com o sistema de cobertura verde e (d) sem isolamento e sem o sistema de cobertura verde. Os resultados demonstraram que para um período de verão (maio a setembro) a redução da demanda por arrefecimento nos sistemas com cobertura verde variou de 15% a 49% para a simulação do edifício sem isolamento e de 6% a 33% para as simulações do edifício com isolamento [25].

Os autores do artigo [26] realizaram uma análise dos resultados de vários estudos sobre o uso de cobertura verde em coberturas bem isoladas. Forneceram também dados do experimento implementado por eles em um edifício de testes altamente isolado (equipado com sistema de irrigação matutino de uma hora) localizado na Itália. Com essas informações puderam confirmar que os efeitos do sistema são menos efetivos em edifícios dotados de um alto isolamento térmico na cobertura, o que demonstra que o uso da cobertura verde é mais indicado para reformas e reabilitações de edifícios existentes.

Por fim, Lamberts e Parizotto demonstraram que a cobertura verde (vegetal) pode trazer muitos benefícios quando aplicada em climas do Brasil, especificamente no clima temperado. O estudo foi realizado na cidade de Florianópolis, capital do estado de Santa Catarina, e se deu na comparação entre três tipos de telhados (verde, cerâmico e metálico) aplicados em uma residência unifamiliar experimental. Os resultados mostraram que em relação às temperaturas do ar interno, a cobertura verde apresentou menor amplitude diária durante o período quente,

garantindo benefícios térmicos no clima temperado no verão. Deve, no entanto, referir-se que os dados foram coletados em salas diferentes do mesmo edifício, as quais apresentavam posicionamento, sombreamento, inclinação dos telhados, alturas e geometrias diferentes [27].

2.3.3 Ventilação de conforto

Segundo a ASHRAE [28], a ventilação pode ser definida como a circulação de ar intencional, entrada e saída, dentro de uma edificação. Ela pode ser subdividida em ventilação natural e ventilação forçada, em que a primeira é o fluxo de ar através das aberturas da edificação, impulsionado pelos diferenciais de pressão produzidos normalmente. Já a segunda se dá pelo uso de equipamentos mecânicos para controlar a entrada e a saída de ar do interior da edificação.

A ventilação de conforto é uma técnica que utiliza o efeito de arrefecimento direto, que ocorre por meio do aumento da convecção junto dos ocupantes, resultante do aumento da velocidade do ar interno. Por outro lado, a ventilação noturna (técnica descrita no item 2.3.4) acontece por meio do efeito de arrefecimento indireto [29].

Esse efeito direto fisiológico de arrefecimento, pode acontecer quando o fluxo de ar que vem do exterior do edifício, através da abertura de uma janela por exemplo, tem uma determinada velocidade que possibilita a ampliação do limite superior da zona de conforto além do limite do ar interno, que se encontra em condição de repouso. Esse processo ocorre normalmente em período diurno, e pode diminuir a temperatura no interior do ambiente, quando ela é superior à temperatura exterior em casos de edifícios sem qualquer tipo de ventilação natural [9].

O projetista pode potenciar esse fenômeno utilizando a ventilação cruzada (Figura 2-8), na qual as formas e aberturas do edifício provocam efeitos aerodinâmicos em torno das construções, resultando em zonas de pressões positivas e negativas. Desta maneira pode-se conseguir um melhor desempenho da ventilação natural [11].

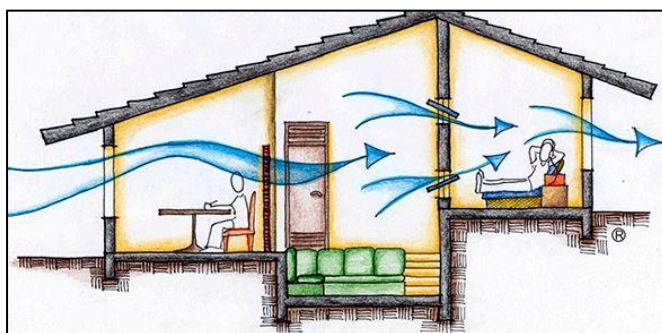


Figura 2-8: Ventilação cruzada [16]

2.3.4 Ventilação noturna

A ventilação noturna, também chamada de arrefecimento convectivo noturno, é uma das técnicas de arrefecimento passivo mais eficientes de acordo com vários estudos atuais.

Baseada principalmente na diferença entre as temperaturas do ambiente interno e externo da edificação durante o período noturno, o potencial desse tipo de ventilação depende, para um determinado local, do caudal de ar, da capacidade térmica do edifício e da ligação adequada da massa térmica com o fluxo de ar [3].

Essa estratégia utiliza o ar exterior (frio) da noite para arrefecer por convecção o edifício. Desta maneira, durante o período diurno a estrutura funcionará como um dissipador de calor, utilizando essa massa arrefecida para absorver o calor produzido no interior do edifício, fazendo com que o aumento da temperatura ao longo do dia diminua [9]. A Figura 2-9 apresenta um exemplo esquemático de um sistema ventilação noturna.

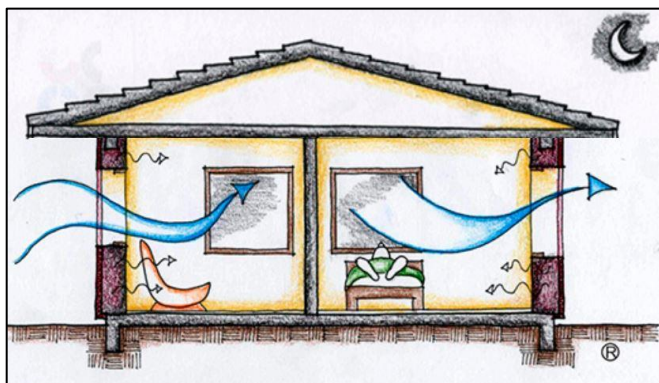


Figura 2-9: Sistema de ventilação noturna [16]

Em edificações com poucas aberturas e conseqüentemente pouca ventilação, podem ser utilizados “*Windcatcher’s*”, também chamados por alguns autores de coletores de vento ou torres de vento. Estes dispositivos são projetados para captar e canalizar o ar fresco para o ambiente interno da edificação e na maioria das vezes são instalados nos telhados das construções [30]. A Figura 2-10 apresenta um desenho esquemático de uma torre de vento.

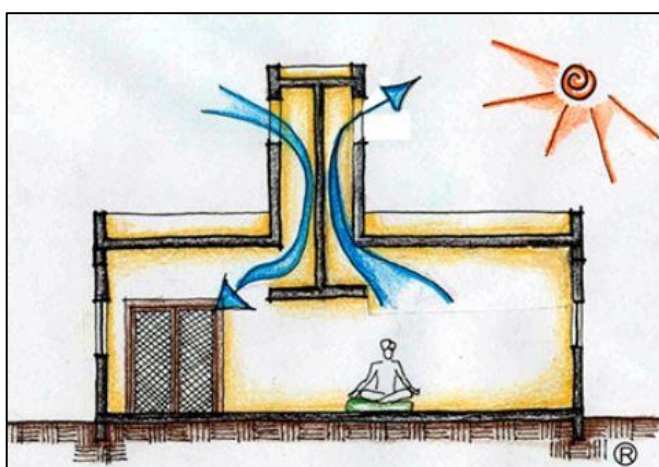


Figura 2-10: Torre de vento [16]

A influência da ventilação noturna natural, aplicada em edifícios com massa térmica alta, no arrefecimento da temperatura interna dos ambientes pode ser comprovada com a análise do artigo [31]. O estudo foi realizado no clima quente e úmido de Israel no período de verão. Os autores efetuaram simulações em quatro locais distintos, com quatro níveis de ventilação noturna (2, 5, 20 e 30 renovações por hora) e quatro níveis de massa térmica (edifício leve, semi-leve, semi-pesado e pesado) para um típico prédio de apartamentos israelense. Os autores concluíram que para o clima e período em estudo é possível alcançar uma redução de 3 a 6 °C num edifício de construção pesada apenas com ventilação natural. Desta maneira, afirmam também que o arrefecimento obtido na temperatura do ambiente interno está relacionado com a quantidade de massa térmica, a taxa de ventilação noturna e a variação da temperatura (entre o dia e a noite) no local.

A experiência apresentada em [32] foi executada na Malásia e tem resultados interessantes a respeito da eficiência da técnica de ventilação noturna. Os investigadores monitoraram duas casas geminadas adjacentes típicas do país, idênticas e com alta inércia térmica, entre os meses de junho a agosto. Eles comparam três casos distintos: (a) comparação entre ventilação noturna e ventilação diurna, (b) comparação entre ventilação noturna e nenhuma ventilação, e (c) comparação entre ventilação noturna e ventilação de dia inteiro. Cada caso foi monitorado por 6 dias e as temperaturas mínimas e máximas do ar externo foram 24-25 °C e 34-36 °C, respectivamente para o período estudado.

Como esperado, a ventilação noturna apresentou um potencial maior de arrefecimento do que as demais estratégias, reduzindo o pico de temperatura do ar interno em 2,5 °C e a temperatura noturna do ar em 2 °C (em média). Entretanto, se a perda de calor evaporativa dos ocupantes for levada em consideração, a ventilação noturna não funciona com tanta eficiência no fornecimento de conforto térmico durante o dia. Isso ocorre devido às condições de alta umidade da Malásia, em que, se não houver um controle da umidade interna durante o dia, a ventilação noturna acaba sendo superada pela ventilação de dia inteiro no potencial de arrefecimento.

Além destes estudos, o artigo [33] também apresenta resultados satisfatórios que podem confirmar a eficiência da ventilação noturna. Os autores realizaram simulações aliadas a dados experimentais para estudar o comportamento de três edifícios em escala real (com estrutura, tipo de ventilação, layout e características regionais distintas) localizados em Atenas. Os resultados demonstraram que as técnicas de ventilação noturna podem diminuir consideravelmente a carga de arrefecimento para ar condicionado e melhorar os níveis de conforto nos edifícios em flutuação livre.

Portanto a efetividade de um sistema de ventilação noturna depende das características da estrutura do edifício, do caudal de ar, das condições climáticas e layout da localização da edificação e do acoplamento eficaz do fluxo de ar com a massa térmica do edifício [33].

2.3.5 Materiais de mudança de fase (PCM)

A principal característica dos materiais de mudança de fase, PCMs (“phase change materials”), é a sua grande capacidade de armazenamento de energia térmica (calor), que é muito superior à dos materiais de construção convencionais [34].

Existe uma grande variedade de materiais de mudança de fase, cada um opera dentro de uma determinada gama de temperaturas, com distintas faixas de temperatura de fusão e faixas de entalpia de fusão. Essas características estão relacionadas com os diferentes componentes químicos destes materiais, e por este motivo os PCMs são divididos em três categorias principais: orgânicos, inorgânicos e eutéticos [35].

Os materiais PCMs podem ser utilizados de diferentes formas na construção civil, condicionando o seu desempenho em termos de armazenamento de calor. As formas mais correntes são: a adição a materiais tradicionais, por impregnação ou imersão; e o encapsulamento (macro ou micro) [36]. A Figura 2-11 esquematiza o funcionamento de um PMC microencapsulado.



Figura 2-11: Esquema representativo do comportamento térmico do PCM microencapsulado, adaptado de [36]

No artigo [37] é apresentada uma revisão de vários estudos sobre as características dinâmicas e o desempenho energético de edifícios que utilizam sistemas com PCMs. Segundo os autores, as aplicações desses materiais em edificações podem ser divididas em quatro categorias: armazenamento gratuito, desvio da carga de pico, sistemas ativos e sistemas passivos (controle térmico).

Em sistemas de construções passivas, na maioria das vezes, os PCMs são integrados na envolvente (paredes, coberturas, forros, pisos ou janelas) dos edifícios para aumentar a massa térmica da edificação. O uso desta técnica para regular o ambiente térmico está condicionada ao seguinte processo: quando a temperatura dentro do ambiente sobe, durante o dia, as ligações químicas começam romper-se e o material passa por um processo de fusão, absorvendo calor durante esta mudança de fase. No momento que a temperatura do ambiente volta a diminuir, durante a noite, o material regressa ao estado sólido e liberta novamente o calor que havia absorvido. Este processo permite, entre outras coisas, suavizar as flutuações

de temperatura durante o dia, reduzindo as temperaturas de pico para aquecimento e arrefecimento. Desta forma, um espaço com PCMs devidamente dimensionados pode proporcionar um ambiente mais confortável [37].

O estudo apresentado em [38] mostra resultados da utilização de PCMs para melhoria do conforto térmico de ambientes. Neste trabalho compararam-se duas células-teste para avaliação dos efeitos do PCM na resposta térmica. Uma das células era feita de painéis comerciais de “drywall” (célula de controle) e a outra era dotada de nano-PCM, que consistia numa mistura eutética de ácidos graxos apoiada por nanofolhas interconectadas de grafite incorporadas a um painel de gesso (célula com PCM). Depois de uma análise experimental e numérica os pesquisadores demonstraram que a célula com PCM conseguiu manter a temperatura interna entre 18,5 °C e 26,5 °C enquanto na célula de controle a temperatura interna flutuou na gama de 13 °C a 32 °C.

Outro estudo, realizado na França, investigou a eficiência de um painel de PCM integrado em paredes de divisórias internas. Os resultados demonstraram que a temperatura de uma sala experimental sem o material PCM oscilou de 18,9 °C a 36,6 °C, enquanto na sala com o sistema PCM variou de 19,8 °C a 32,8 °C, ou seja a incorporação do PCM permitiu uma redução das flutuações da temperatura do ar da sala em cerca de 4,7 °C e diminuiu os efeitos dos picos de calor [39].

Os autores do artigo [40] realizaram uma análise em modelos experimentais com material PCM macro encapsulado incorporado em paredes de concreto. Os testes aconteceram variando a posição do material nas paredes (externamente colado, laminado internamente e internamente colado). O estudo foi realizado na China e os resultados foram um pouco diferentes para cada posição do material. No entanto, quando comparados com os modelos de controle (sem o material PCM), os modelos que tinham PCM apresentaram sempre flutuações de temperatura mais suaves e menores temperaturas de pico. A abordagem mais vantajosa foi a posição que emprega o PCM laminado internamente nas paredes de concreto.

2.3.6 Arrefecimento utilizando o solo

O arrefecimento de ambientes utilizando o solo é uma técnica de dissipação do excesso de calor adquirido pela edificação. Atualmente existem muitos estudos sobre o assunto e diversas técnicas foram testadas por vários autores, que garantem a eficiência deste sistema.

O comportamento térmico do solo, a uma certa profundidade, é caracterizado por ter pouca variação climática, quando comparado ao que acontece no ambiente externo. Por este motivo, o arrefecimento por meio do solo pode ser muito eficaz para diminuir a temperatura interna de edificações e garantir conforto térmico aos usuários no período de verão.

Joaquim Vaz [41], na sua tese de doutoramento, refere duas formas para arrefecer a partir do solo: o contato direto (total ou parcial) da edificação com o meio dissipador, que garante que a envoltória realize trocas de calor com o solo; e o contato indireto, que utiliza permutadores de calor solo-ar para fazer a transferência do calor. O segundo processo é realizado por meio de

sistemas de dutos enterrados auxiliados por ventiladores para arrefecer o ambiente, fazendo com que o ar passe pelos tubos para ser arrefecido pelo solo, sendo depois admitido no edifício com a sua temperatura já corrigida.

Para que a técnica de tubos enterrados seja eficiente deve-se atentar a algumas características do sistema que podem condicionar consideravelmente seu desempenho, como: o diâmetro e comprimento do tubo; a profundidade de penetração do sistema no solo; o caudal de ar; as características térmicas do solo; e o material utilizado para a construção do tubo [3]. A Figura 2-12 representa um desenho esquemático de um sistema de tubos enterrados (ar).

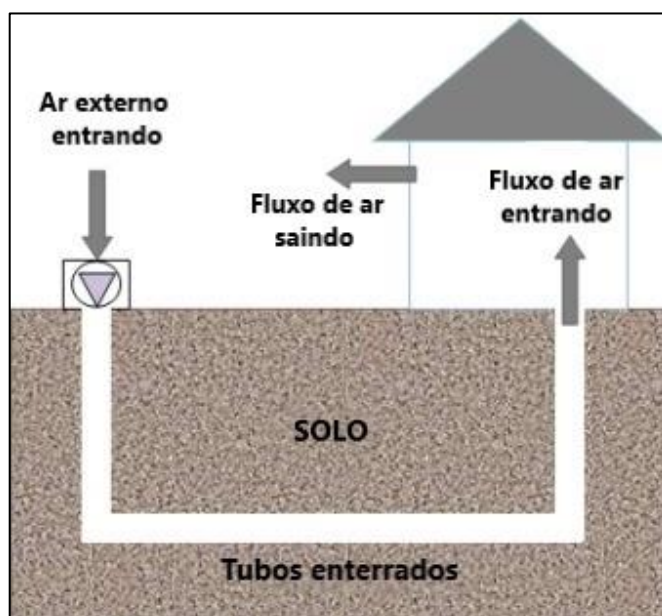


Figura 2-12: Sistema arrefecimento através de tubos enterrados (ar), adaptado de [42]

A técnica de contato direto da edificação com o solo apresenta várias vantagens de utilização, dentre elas: infiltrações limitadas; baixo custo de manutenção; diminuição de ruídos e vibrações; e proteção contra incêndios, tempestades e radiação solar direta. Porém, essa técnica pode desencadear alguns problemas no edifício, como: condensações internas; baixa qualidade do ar interior; e pouca iluminação natural [43] [44].

Esse tipo de arrefecimento pode não ser muito eficiente em climas com verões muito quentes em que solo também apresenta temperaturas consideravelmente altas. Nestas circunstâncias, as temperaturas mais baixas só seriam atingidas a grande profundidade, exigindo uma escavação de grande dimensão que do ponto de vista económico pode inviabilizar o investimento. Baruch Givoni [45] estudou dois tipos de arrefecimento do solo que podem ser alternativas para essa problemática, são eles: arrefecimento do solo utilizando uma camada de material granular (cascalho até 10 cm) regada pela manhã; e arrefecimento do solo úmido sob edifícios elevados.

O artigo [3] refere vários estudos sobre a aplicação do sistema de permutadores de calor terra-ar para diferentes tipos de edifícios em alguns países, entre eles: Bélgica, Alemanha, Suíça, Noruega, Itália, Grécia, Índia, França, Roménia e Portugal. O artigo caracteriza os principais resultados de cada um deles e diz que o sistema pode ter grande eficiência para baixar o gasto com energia em edifícios. Porém, o trabalho também identifica muitas variáveis que influenciam nesse processo, como: número, diâmetro, comprimento e profundidade dos tubos, além do modo de gestão e uso global do sistema de energia.

2.3.7 Sombreamento

As técnicas de sombreamento de edificações são caracterizadas pela alta proteção contra a radiação solar e consequentemente a redução da temperatura interna do edifício por limitação dos ganhos solares.

A eficiência do uso da sombra para proteger edificações está diretamente relacionada com a posição do edifício em relação a trajetória do sol. O sombreamento pode ser obtido através de algum objeto ou superfície intermediário entre o sol e a edificação ou pela própria edificação. A localização da edificação pode condicionar desde logo o seu sombreamento, uma vez que já estará sujeita às condições do lugar em que foi inserida, como eventuais sombras de vegetação, montanhas ou construções vizinhas. A Figura 2-13 demonstra algumas formas de sombreamento de edificações.



Figura 2-13: Proteção solar através do sombreamento da edificação [16]

Os dispositivos de sombreamento podem ser externos, intermediários ou internos, fixos ou ajustáveis ou uma combinação deles. O externo é mais eficiente pois bloqueia a radiação solar antes de ela chegar ao edifício, porém o interno é mais económico e pode ser controlado de modo mais simples [46].

As principais estratégias utilizadas para alcançar um sombreamento eficiente são:

- Utilização de telhados grandes e beirais para sombreamento de fachadas e janelas;
- Uso de pergolados;
- Aproveitamento ou implantação de vegetação para sombrear;

- Elementos internos (prateleiras de luz, cortinas e persianas);
- Uso de brises, que podem ser fixos ou móveis, verticais, horizontais ou mistos.

O autor do artigo [46] realizou um estudo baseado em simulações de um mesmo edifício em Milão e em Atenas. A simulação realizada para o mês de julho utilizou um elemento de sombreamento externo ajustável e resultou numa diferença máxima nas temperaturas de cerca de 5 °C para Milão e cerca de 6 °C para Atenas, evidenciando assim a importância do controlo dos ganhos solares para a minimização do sobreaquecimento.

3. Metodologia

3.1 Simulação térmica e energética

Segundo os pesquisadores do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações [47], os programas de simulação computacional de desempenho energético integram diferentes modelos físicos para processar a interação de diversos sistemas da edificação. As ferramentas computacionais podem ser utilizadas tanto na fase de projeto como na fase de construção para melhor escolha das estratégias e métodos construtivos empregados no empreendimento. Estes métodos trazem várias vantagens, como a possibilidade de identificação da importância relativa de cada fator isoladamente. Neste trabalho foi utilizado o programa *DesignBuilder* para a modelação do caso de estudo. Este programa recorre ao algoritmo do *EnergyPlus* para fazer o cálculo térmico e energético em regime transiente.

3.1.1 *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* é derivado de dois programas com origem entre o final dos anos 70 e o início dos anos 80, o *BLAST* e o *DOE-2*. O programa conta com a combinação das melhores funcionalidades dos programas predecessores e utiliza um novo código *FORTRAN 90* para efetuar a análise do consumo de energia e da carga térmica de um edifício ao longo de um período de tempo, levando em conta a concepção física e os sistemas mecânicos do edifício em questão [48]. Nas suas versões mais recentes o código do programa foi atualizado para linguagens de programação mais atuais.

Nesse âmbito, o *EnergyPlus* pode ser definido como um conjunto de sistemas modulares integrados, nos quais o programa realiza simulações energéticas de edifícios para modelar sistemas de aquecimento e arrefecimento, iluminação, ventilação e outros fluxos energéticos.

Essas simulações são efetuadas sobretudo com base em entradas de texto, requerendo algum esforço para a definição dos parâmetros de entrada e para a visualização dos resultados. No entanto, o *EnergyPlus* pode ser utilizado em conjunto com uma interface gráfica para facilitar a parametrização do modelo (geometria, envolvente, ocupação, iluminação, etc.) e acelerar o processo de modelação e cálculo [49]. A interface utilizada nesta dissertação foi o *DesignBuilder*, cuja definição é apresentada na próxima subsecção.

3.1.2 *DesignBuilder*

O software *DesignBuilder* é uma interface gráfica avançada que foi especialmente desenvolvida para executar simulações *EnergyPlus*. O autor [50] define o software como uma interface que permite uma rápida e precisa introdução de dados e parâmetros, o que traz várias vantagens em termos de produtividade. O autor também sintetizou e listou alguns desses pontos positivos:

- Criação rápida de modelos 3D de edifícios, permitindo importar plantas e usar ferramentas de desenho;
- Divisão do edifício por zonas utilizando ferramentas próprias;
- Introdução de sistemas (AVAC, águas sanitárias e iluminação) com facilidade para todo o edifício ou para cada zona;
- Visualização gráfica do modelo em 3D;
- Introdução de ganhos de atividade de forma rápida e fácil;
- Facilidade na exportação dos resultados das simulações.

As informações desenvolvidas no software *DesignBuilder* são compiladas em ficheiros em formato “.idf”, para que sejam reconhecidas pelo *EnergyPlus*. Além dos ficheiros “.idf”, a simulação também requer arquivos de dados climáticos com a extensão “.epw” (*Energy Plus Weather File*) [49].

3.2 Caso de estudo

3.2.1 Localização e caracterização do edifício

O alvo do estudo é um bloco de salas de aula da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Pato Branco, localizado na cidade de Pato Branco, na região sudoeste do estado do Paraná, no Brasil. Segundo a informação disponibilizada pela prefeitura da cidade [51], o município está situado a aproximadamente 760 metros de altitude e conta com uma área territorial de 539.029 km² e 83.843 habitantes. A Figura 3-1 ilustra a localização de Pato Branco.



Figura 3-1: Localização de Pato Branco, adaptado de [52]

Atualmente a UTFPR tem mais de 32 mil estudantes regulares entre os cursos técnicos, as graduações e as pós-graduações, que estão divididos entre os 13 polos espalhados pelo estado do Paraná, além disso, a força de trabalho da universidade conta com 2.549 professores e 1.176 técnicos-administrativos. O campus de Pato Branco tem uma área de implantação de aproximadamente 138.383 m². A Figura 3-2 apresenta uma vista aérea do campus com a delimitação, em vermelho, do bloco que será o caso de estudo desta dissertação.



Figura 3-2: Localização do edifício em estudo (bloco M), adaptado de [53]

O bloco em estudo, que será designado ao longo da dissertação de bloco M, na realidade é uma ampliação do bloco M, mas como a instituição não detém posse dos projetos da parte antiga da edificação, o estudo será focado apenas na construção mais recente, que pode ser observada nas fotos presentes na Figura 3-3.



Figura 3-3: Vista frontal (esquerda) e vista posterior (direita) do bloco M

O bloco M tem uma área total construída de 764,95 m² e é composto por dois pisos, cada um deles com três salas de aula, quatro instalações sanitárias e uma zona de circulação entre o corredor externo e as instalações sanitárias. A estrutura da edificação é formada por vigas e pilares de concreto armado com fechamento em alvenaria de blocos cerâmicos aparentes. Os vãos incluem janelas tipo pele de correr, janelas basculantes e veneziana fixa de alumínio e vidro, portas externas de madeira e portas de alumínio internas nas instalações sanitárias. A Figura 3-4 apresenta o interior da Sala de Aula 2PP.



Figura 3-4: Interior da Sala de Aula 2PP

Os projetos e as informações construtivas para caracterização do bloco M foram disponibilizados pelo Departamento de Projetos e Obras (DEPRO) da UTFPR. Existem, no entanto, algumas pequenas diferenças entre o projeto e edifício real, nomeadamente: a utilização de duas salas de aula que foram adaptadas para ser a coordenação do curso de química (COQUI), que implicou mudanças nas janelas no alçado principal do edifício, nas divisórias internas e na utilização de ar condicionado na nova sala.

No entanto, o estudo desenvolvido nesta dissertação foi realizado com foco no projeto original, sem considerar essas alterações, por falta de informações que necessitavam ser recolhidas no local. Além disso, é mais interessante para o objetivo desta dissertação efetuar a análise do conforto térmico apenas em salas de aula, por causa da semelhança com os outros blocos do campus. Desta forma, pode haver uma generalização das conclusões, ficando-se com uma ideia geral do desconforto térmico sentido pelos estudantes que utilizam os outros blocos da universidade. As plantas do primeiro pavimento (PP) e do pavimento térreo (PT) podem ser observadas na Figura 3-5.

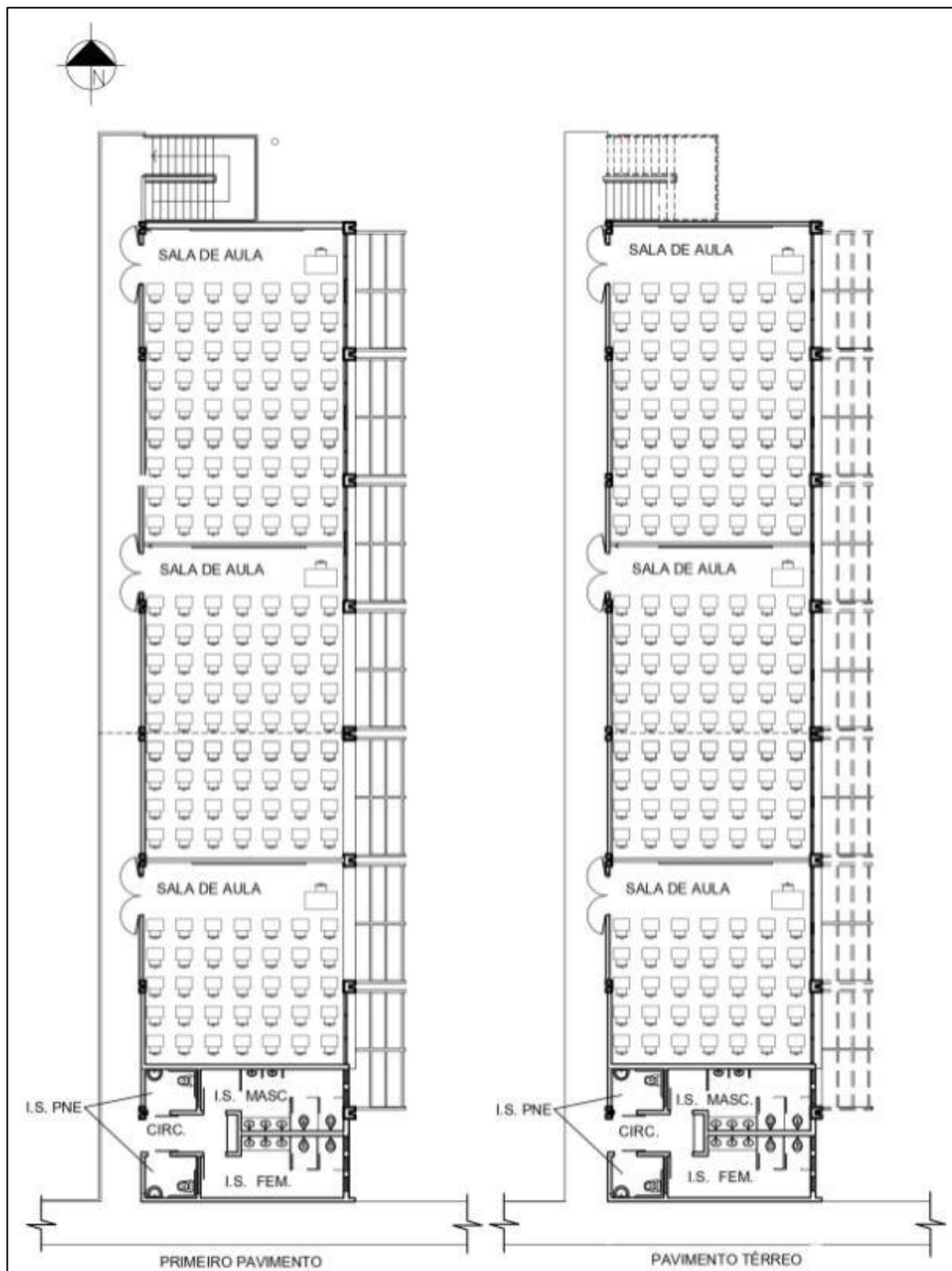


Figura 3-5: Plantas baixas dos dois pavimentos da edificação

3.2.2 Dados climáticos

O território brasileiro é conhecido por sua grande extensão territorial. Conseqüentemente os estados que formam o país têm grande diversidade em características geográficas, extensão territorial, relevo e dinâmica de massas de ar entre si. Estes fatores contribuem diretamente para que o Brasil possua grandes diferenças climáticas entre cada região do país.

Segundo Tabalipa e Fiori [54], a cidade de Pato Branco possui influência de um clima chuvoso, mesotérmico, úmido, e superúmido sem estação seca, de verões frescos e geadas severas e bastante frequentes.

Para que a presente dissertação apresentasse resultados condizentes com a realidade era necessário aplicar ao software de simulação uma base de dados de caracterização climática específica do local em estudo. Porém, como a cidade de Pato Branco ainda não conta com essa base de dados disponíveis na plataforma utilizada, a alternativa foi utilizar os dados climáticos de uma cidade vizinha, aproximadamente a 42 km de Pato Branco, que tem um clima consideravelmente parecido.

O local em questão é o município de Novo Horizonte, no estado de Santa Catarina. O ficheiro com os dados climáticos foi retirado da plataforma “PROJETEEE” (Projetando Edificações Energeticamente Eficientes) [55], do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações que está vinculado ao departamento de engenharia civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os arquivos climáticos presentes no ficheiro foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) [56], apresentando dados sobre temperatura, precipitação, umidade relativa, radiação, carta solar e ventos ao longo do ano. A Figura 3-6 apresenta o gráfico das temperaturas médias mensais e a Figura 3-7 apresenta o gráfico da radiação média mensal, para a cidade de Novo Horizonte.

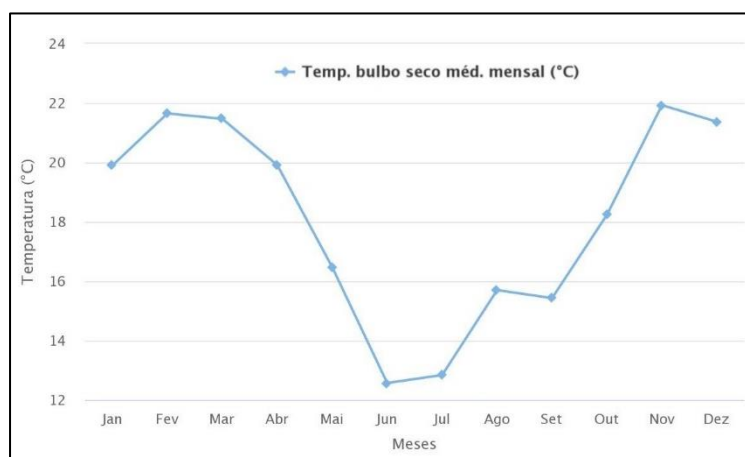


Figura 3-6: Gráfico da temperatura média mensal em Novo Horizonte – SC, adaptado de [55]

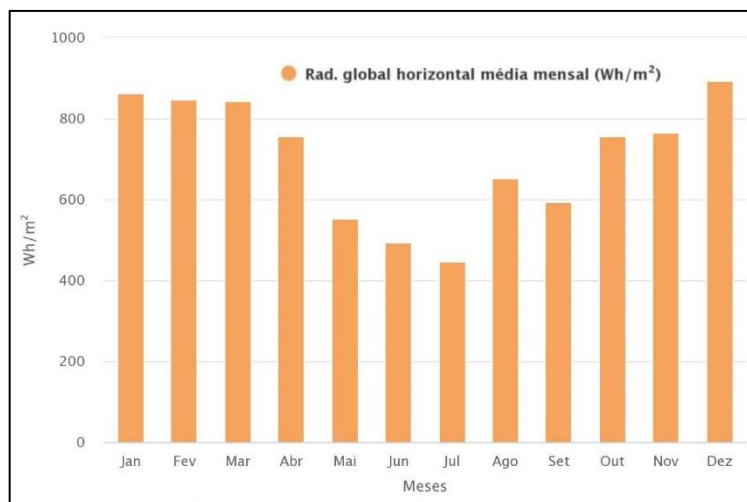


Figura 3-7: Gráfico da radiação média mensal em Novo Horizonte – SC, adaptado de [55]

3.2.3 Elementos Construtivos

Os elementos construtivos e os respectivos materiais utilizados no modelo do edifício foram definidos com base na memória descritiva e nas peças desenhadas do projeto que foram cedidas pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. As propriedades dos materiais de construção foram escolhidas a partir da consulta de bases de dados, incluindo a do próprio software *DesignBuilder*.

3.2.3.1 Paredes

- Parede externa tipo E1

O desenho esquemático apresentado na Figura 3-8 mostra a constituição da parede externa tipo E1 que é utilizada nas salas de aula. A parede tem coeficiente de transmissão térmica $U=2,925$ ($W/m^2 \cdot K$) e é dotada dos seguintes materiais (do exterior para o interior):

1. Bloco cerâmico de dois furos (11,5 cm);
2. Emboço + reboco (3,5 cm).

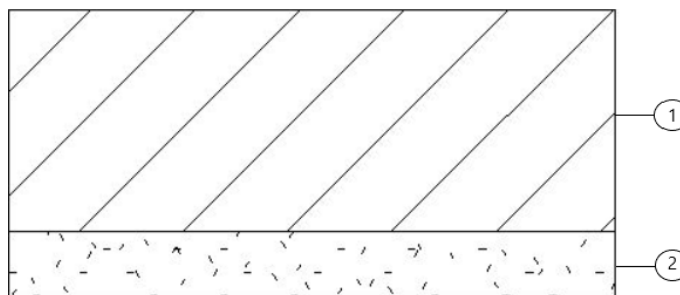


Figura 3-8: Pormenor da constituição da parede externa tipo E1

- Parede externa tipo E2

O desenho esquemático apresentado na Figura 3-9 mostra a constituição da parede externa tipo E2 que é utilizada nas instalações sanitárias. A parede tem coeficiente de transmissão térmica $U= 2,933$ ($W/m^2 \cdot K$) e é dotada dos seguintes materiais (do exterior para o interior):

1. Emboço + Reboco (1,5 cm);
2. Bloco cerâmico de dois furos (11,5 cm);
3. Argamassa de colagem (1,0 cm);
4. Revestimento cerâmico (1,0 cm).

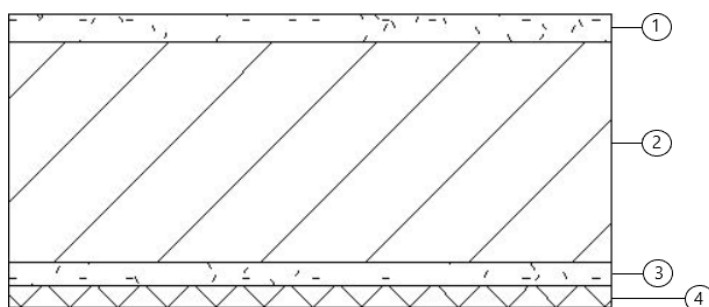


Figura 3-9: Pormenor da constituição da parede externa tipo E2

- Parede externa tipo E3

O desenho esquemático apresentado na Figura 3-10 mostra a constituição da parede externa tipo E3 que é utilizada nas instalações sanitárias. A parede tem coeficiente de transmissão térmica $U= 2,921$ ($W/m^2 \cdot K$) e é dotada dos seguintes materiais (do exterior para o interior):

1. Bloco cerâmico de dois furos (11,5 cm);
2. Argamassa de colagem (2,5 cm);
3. Revestimento cerâmico (1,0 cm).

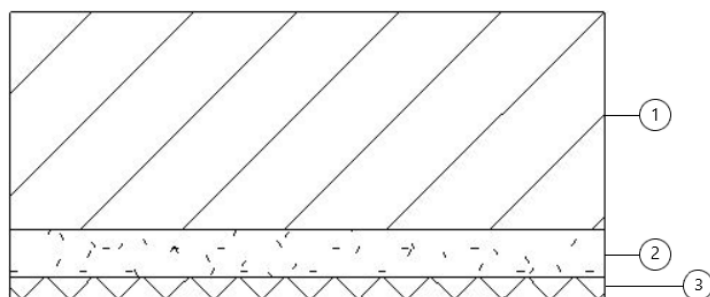


Figura 3-10: Pormenor da constituição da parede externa tipo E3

- Parede interna tipo I1

O desenho esquemático apresentado na Figura 3-11 demonstra a constituição da parede interna tipo I1 que é utilizada entre as salas de aula. A parede tem coeficiente de transmissão térmica $U= 0,514$ ($W/m^2 \cdot K$) e é dotada dos seguintes materiais:

1. Placa de gesso acartonado (1,25 cm);
2. Camada de ar (2,375 cm);
3. Preenchimento com lã mineral (5,0 cm);
4. Camada de ar (2,375 cm);
5. Placa de gesso acartonado (1,25 cm).

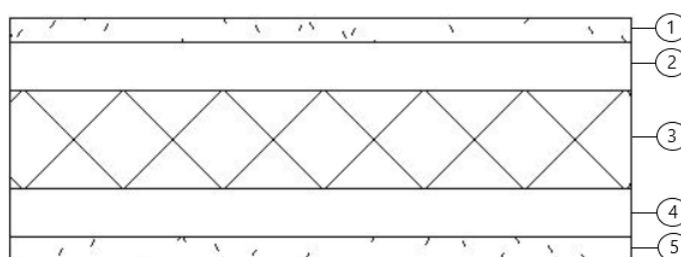


Figura 3-11: Pormenor da constituição da parede interna tipo I1

- Parede interna tipo I2

O desenho esquemático apresentado na Figura 3-12 mostra a constituição da parede interna tipo I2 que é utilizada entre as instalações sanitárias. A parede tem coeficiente de transmissão térmica $U= 2,950$ ($W/m^2 \cdot K$) e é dotada dos seguintes materiais:

1. Revestimento cerâmico (1,0 cm);
2. Argamassa de colagem (0,75 cm);
3. Bloco cerâmico de dois furos (11,5 cm);
4. Argamassa de colagem (0,75 cm);
5. Revestimento cerâmico (1,0 cm).

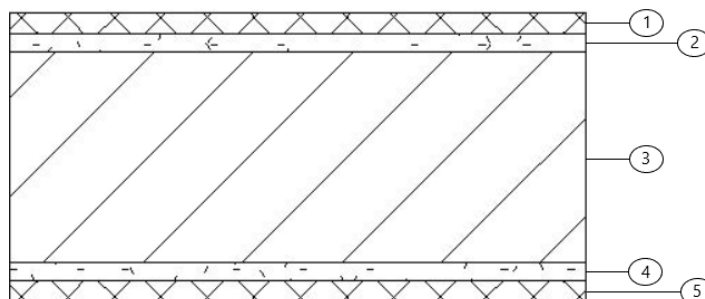


Figura 3-12: Pormenor da constituição da parede interna tipo I2

3.2.3.2 Pavimentos

- Pavimento térreo

O desenho esquemático apresentado na Figura 3-13 mostra a constituição do pavimento térreo que fica em contato com o solo, dotado dos seguintes materiais:

1. Revestimento de piso:
 - a) Placa vinílica semiflexível de alto tráfego nas salas de aula (0,2 cm);
 - b) Piso em placa granitina na circulação e corredores externos (1,0 cm);
 - c) Piso cerâmico de alto tráfego (1,0 cm).
2. Camada de regularização de cimento e areia (3,0 cm);
3. Contrapiso (5,0 cm);
4. Lastro de pedra britada n.º 2 (10,0 cm);

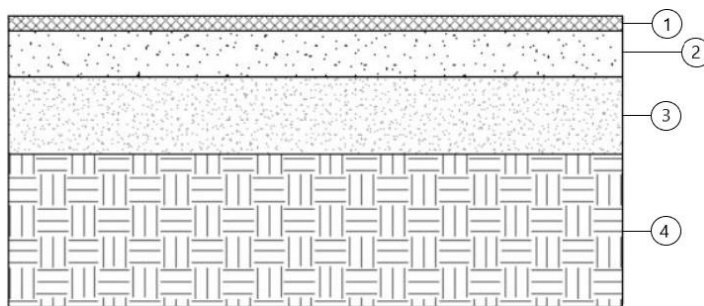


Figura 3-13: Pormenor da constituição do pavimento térreo

Como os pavimentos são constituídos por componentes de revestimento distintos, acabam por ter diferentes propriedades. Com isso, o valor do coeficiente de transmissão térmica do pavimento térreo para as salas de aula, circulação e instalações sanitárias é, respectivamente: $U = 2,364$ ($W/m^2 \cdot K$), $U = 2,425$ ($W/m^2 \cdot K$) e $U = 2,401$ ($W/m^2 \cdot K$).

- Pavimento intermediário

O desenho esquemático apresentado na Figura 3-14 mostra a constituição do pavimento intermediário das salas de aula e da circulação, dotado dos seguintes materiais:

1. Revestimento de piso:
 - a) Placa vinílica semiflexível de alto tráfego nas salas de aula (0,2 cm);
 - b) Piso em placa granitina na circulação e corredores externos (1,0 cm).
2. Camada de regularização de cimento e areia (3,0 cm);
3. Laje em concreto armado (15,0 cm);
4. Reboco (3 cm).

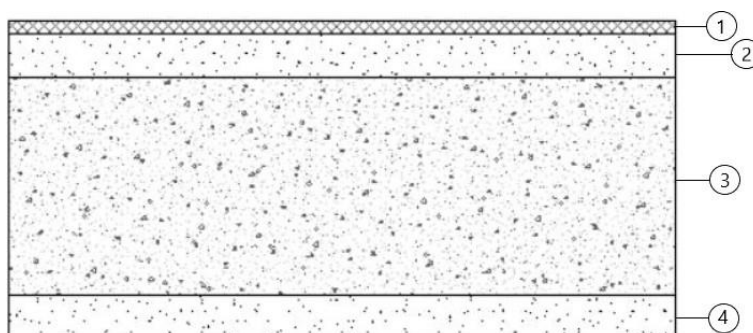


Figura 3-14: Pormenor da constituição do pavimento intermediário - salas de aula e circulação

O valor do coeficiente de transmissão térmica do pavimento intermediário para as salas de aula e circulação são, respectivamente: $U= 2,834$ ($W/m^2 \cdot K$) e $U= 2,923$ ($W/m^2 \cdot K$).

O desenho esquemático apresentado na Figura 3-15 mostra a constituição do pavimento intermediário das instalações sanitárias. O pavimento tem um coeficiente de transmissão térmica $U= 1,709$ ($W/m^2 \cdot K$) e é dotado dos seguintes materiais:

1. Revestimento em piso cerâmico de alto tráfego (1 cm);
2. Camada de regularização de cimento e areia (3 cm);
3. Laje em concreto armado (15 cm);
4. Reboco (3 cm);
5. Camada de ar (20 cm);
6. Forro de PVC (1 cm).

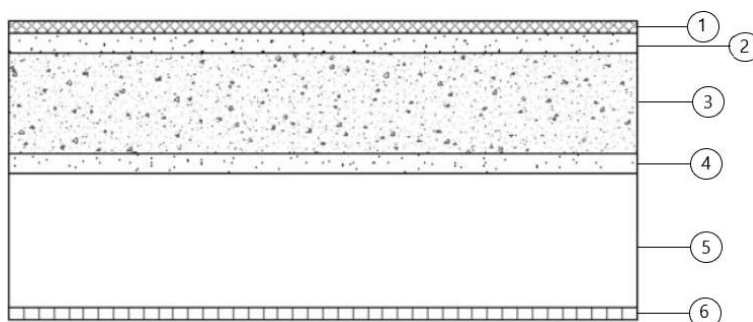


Figura 3-15: Pormenor da constituição do pavimento intermediário das instalações sanitárias

- Cobertura

O desenho esquemático apresentado na Figura 3-16 mostra a constituição do pavimento de cobertura das salas de aula e da circulação. A cobertura tem um coeficiente de transmissão térmica $U= 3,818$ ($W/m^2 \cdot K$) e é dotada dos seguintes materiais:

1. Telha ondulada de fibrocimento (0,8 cm);
2. Laje em concreto armado (15 cm);
3. Reboco (3 cm).

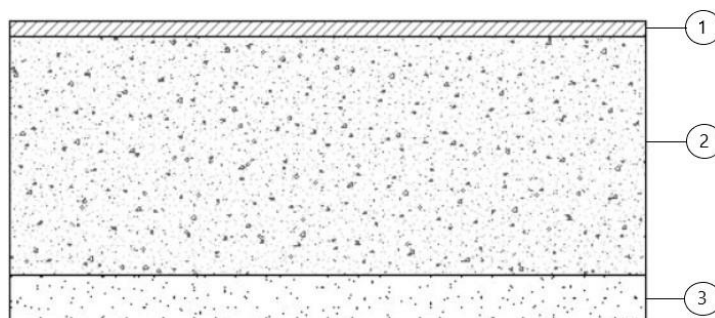


Figura 3-16: Pormenor da constituição da cobertura – salas de aula e circulação

O desenho esquemático apresentado na Figura 3-17 mostra a constituição da cobertura das instalações sanitárias. A cobertura tem um coeficiente de transmissão térmica $U= 1,997$ ($W/m^2 \cdot K$) e é dotada dos seguintes materiais:

1. Telha ondulada de fibrocimento (0,8 cm);
2. Laje em concreto armado (15,0 cm);
3. Reboco (3,0 cm);
4. Camada de ar (20,0 cm);
5. Forro de PVC (1,0 cm).

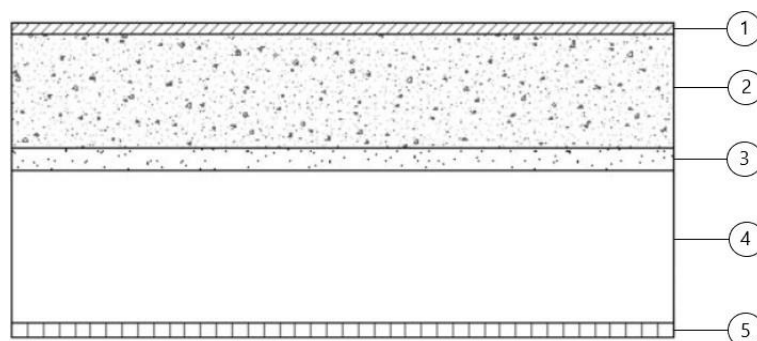


Figura 3-17: Pormenor da constituição da cobertura das instalações sanitárias

- Esquadrias e envidraçados

As janelas têm um coeficiente de transmissão térmica $U= 6,121$ ($W/m^2 \cdot K$) e um fator solar de $g= 0,810$. As caixilharias são em alumínio com vidro simples transparente de 5 mm, do tipo basculantes, pele de correr e veneziana fixa. As portas têm um coeficiente de transmissão térmica $U= 2,823$ ($W/m^2 \cdot K$), têm uma espessura de 35 mm e são divididas em externas e internas. As externas são de madeira e variam entre três tipos: de abrir, de correr ou sanfonada (shaft), as internas são em alumínio e são utilizadas exclusivamente nas instalações sanitárias. As esquadrias referentes ao primeiro pavimento e ao pavimento térreo são idênticas e estão expostas na Tabela 3-1 e Tabela 3-2.

Tabela 3-1: Portas referentes aos dois pavimentos da edificação

Portas						
Cód.	Dimensões	Peitoril	Quant.	Tipo	Material	Local
P1	160 x 210	-	06	Abrir 2 folhas	Madeira	Sala de aula
P2	100 x 210	-	04	Correr 1 folha	Madeira	I.S. PNE
P3	80 x 210	-	04	Abrir 1 folha	Madeira	I. Sanitárias
P4	60 x 210	-	08	Abrir 1 folha	Alumínio anodizado	I.S./Box Sanitário
P5	150 x 210	-	02	Sanfonada 2 folhas	Madeira venezianada	Shaft

Tabela 3-2: Janelas referentes aos dois pavimentos da edificação

Janelas						
Cód.	Dimensões	Peitoril	Quant.	Tipo	Material	Local
J1	455 x 170	110	12	Correr	Alumínio anod. natural	Sala de aula
J2	400 x 35	245	06	Basculante	Alumínio anod. natural	Sala de aula
J3	200 x 35	245	08	Basculante	Alumínio anod. natural	Sala de aula
J4	60 x 60	120/210	16	Correr	Alumínio anod. natural	I. Sanitárias
J5	290 x 170	110	02	Correr	Alumínio anod. natural	Sala de aula
J6	150 x 35	255	04	Venezianada fixa	Alumínio anod. natural	I.S. PNE

Na tabela abaixo (Tabela 3-3) é apresentado um resumo com todos os materiais que constituem os elementos construtivos e as respectivas propriedades necessárias ao térmico: condutibilidade térmica (λ), calor específico (C_p) e massa volúmica (ρ).

Tabela 3-3: Resumo das propriedades dos materiais constituintes dos elementos construtivos

Material	λ (W/m.°C)	C_p (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)
Forro de PVC	0,170	900	1390
Reboco	1,000	1000	1800
Laje em concreto armado	2,300	1000	2300
Telha ondulada de fibrocimento	0,300	800	2000
Cerâmica	1,300	840	2300
Camada de regularização de cimento e areia	0,900	1000	1200
Placa vinílica semiflexível	0,140	1000	1200
Placa granitina	2,800	1000	2600
Pedra britada n.º 2	2,300	1000	2600
Contrapiso	0,410	840	1200
Bloco cerâmico de dois furos	0,840	800	1700
Argamassa de colagem	0,900	1000	1200
Placa de gesso acartonado	0,250	896	2800
Lã mineral	0,038	840	40

3.3 Modelo de Simulação

3.3.1 Geometria

Como já mencionado na caracterização do edifício, o bloco M é composto por dois pavimentos, e cada um deles é composto por três salas de aula, quatro instalações sanitárias e uma circulação entre o corredor externo e as instalações sanitárias. A geometria da edificação foi construída utilizando o software *DesignBuilder* com base nos projetos do edifício. A Figura 3-18 apresenta o modelo 3D da edificação desenhada no software.

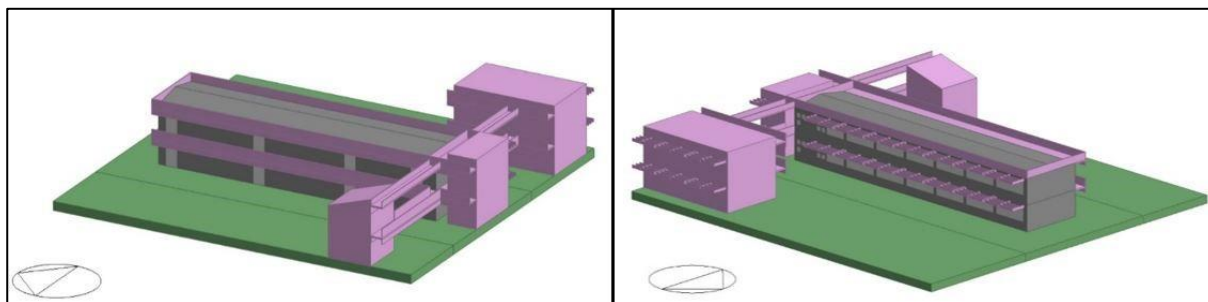


Figura 3-18: Vistas 3D da modelação do bloco M

O bloco em estudo é apenas a parte central da edificação, os outros blocos (a rosa na figura) servem apenas para simular o real sombreamento que existe no local, representados pela parte antiga do bloco M, pelo bloco L e uma escada de concreto que dá acesso ao primeiro pavimento.

A Figura 3-19 extraída do *DesignBuilder* apresenta as plantas do pavimento térreo e do primeiro pavimento, que são idênticas, em termos de forma e área.

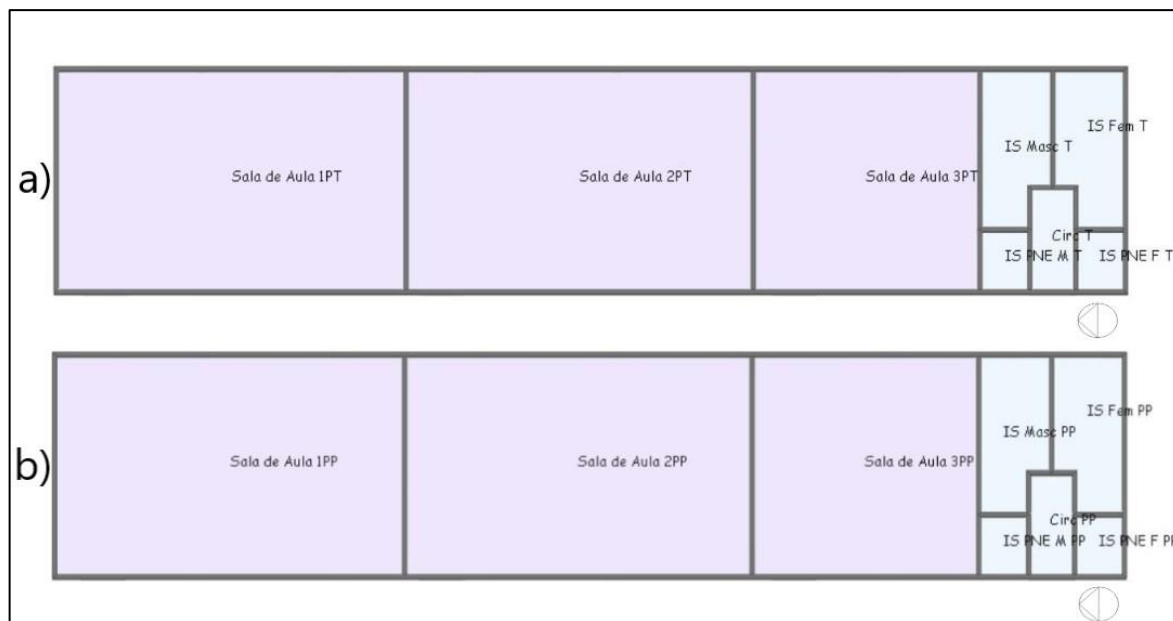


Figura 3-19: Plantas da edificação divididas em zonas, a) pavimento térreo e b) primeiro pavimento

Os pavimentos foram divididos em zonas térmicas e cada uma delas foi nomeada segundo a Figura 3-19. O estudo teve foco nas três salas de aula de cada pavimento, as salas do primeiro pavimento têm dimensões e materiais constituintes iguais as salas do pavimento térreo. A Figura 3-20 apresenta a modelação 3D dos três tipos de sala: a sala de aula 1PT/PP com 99,40 m², a sala de aula 2PT/PP com 99,28 m² e sala de aula 3PT/PP com 64,75 m².

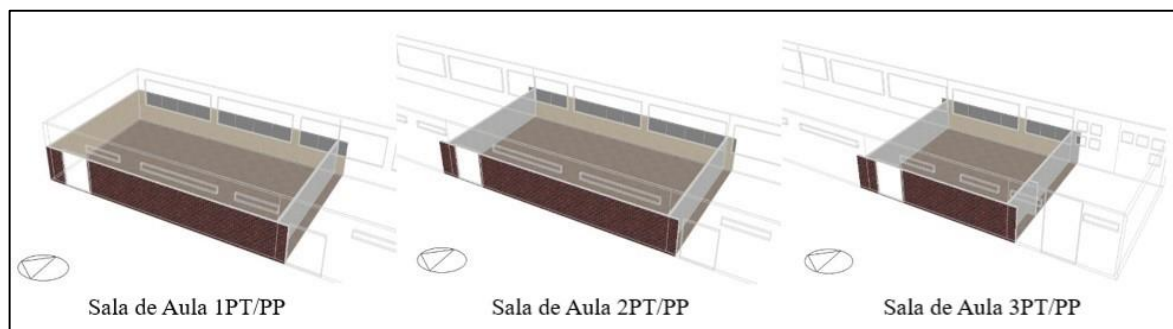


Figura 3-20: Modelação 3D das salas de aula em estudo

3.3.2 Ganhos internos

3.3.2.1 Ocupação

A ocupação do bloco M foi caracterizada utilizando o calendário do *DesignBuilder*, tendo em conta a informação disponibilizada pela instituição UTFPR relativa ao ano de 2020. Para além dos períodos de aulas, o calendário inclui as datas correspondentes às férias e feriados. Assim, durante os períodos letivos, a ocupação ocorre de segunda a sexta das 07:30h até às 12:00h e das 13:00h até às 23:00h. Para inserir essas informações no *DesignBuilder* foi utilizada uma agenda do tipo compacta, que é um recurso de fácil utilização que permite uma liberdade maior na flexibilidade dos horários do que os outros meios disponibilizados pelo software.

A atividade exercida pelos ocupantes da sala de aula pode ser caracterizada para a maioria como uma atividade sedentária de escritório, na qual as pessoas estão sentadas escrevendo. O valor do metabolismo associado a essa atividade é de 108 W/pessoa, de acordo com as normas ASHRAE 55 [4] e ISO 7730 [7].

Para cálculo da densidade de ocupação da sala de aula foi utilizada a seguinte abordagem. Nos projetos fornecidos pelo DEPRO a quantidade de alunos permitidos para a sala 1, sala 2 e sala 3 eram respectivamente, 64, 64 e 35 alunos. Porém 64 alunos é um valor sobredimensionado e uma turma com essa quantidade de alunos é muito improvável. Por este motivo, nestas salas a ocupação foi limitada à ocupação máxima de 50 pessoas. Esta abordagem utiliza a divisão da quantidade de alunos pela área de cada sala a fim de obter resultados em forma de densidade de ocupação, ou seja, o número pessoas por metro quadrado. Os resultados para cada sala estão dispostos na Tabela 3-4.

Tabela 3-4: Densidade de pessoas por metro quadrado em cada sala de aula

Sala de aula	Densidade (pessoa/m ²)
Sala de aula 1PT/PP	0,51
Sala de aula 2PT/PP	0,51
Sala de aula 3PT/PP	0,55

3.3.2.2 Iluminação

Como o alvo do estudo são as salas de aula, presume-se que enquanto existir ocupação as lâmpadas de iluminação estarão ligadas, para manter um melhor desempenho dos alunos. Dessa forma, a agenda de iluminação segue o padrão da ocupação, tendo sido utilizada a mesma abordagem, ou seja, uma agenda do tipo compacta.

Para quantificar a quantidade de energia associada às lâmpadas foi solicitado ao DEPRO uma relação do tipo e marca das lâmpadas do bloco. A informação recebida foi que todas as lâmpadas da edificação foram trocadas recentemente e atualmente são utilizadas lâmpadas

LED de 17 W de potência. A partir desta informação, e tendo em conta a quantidade de lâmpadas que existe em cada sala de aula, chegou-se a um valor de 10 W/m² para quantificar os ganhos internos por iluminação para cada uma das salas.

3.3.3 Ventilação

O efeito da ventilação tem grande importância no desempenho térmico e energético da edificação, principalmente quando se fala em edifícios educacionais, no qual existe uma elevada taxa de ocupação e conseqüentemente grandes preocupações com a qualidade do ar interior. Por outro lado, é sabido o papel muito relevante que a ventilação desempenha no balanço energético [57].

Neste trabalho, foram considerados dois cenários base de ventilação, ambos considerando uma taxa contínua de infiltração de ar na edificação. O cenário inicial considera uma taxa de renovação de ar de 0,5 h⁻¹, enquanto no segundo cenário este valor sobe para 1,0 h⁻¹.

3.3.4 Proteção solar

Quanto ao efeito de sombreamento das janelas, também é difícil de ser quantificado pois quem controla os dispositivos são os próprios usuários. Então, para se aproximar da realidade, foram considerados dois tipos de cenários: o primeiro não conta com nenhum dispositivo de sombreamento, a não ser os brises de concreto e as construções vizinhas que causam sombreamento de algumas partes do bloco M, e o segundo cenário utiliza cortinas internas, apenas nas janelas da face posterior da edificação, que trabalham com controle solar para imitar o controle realizado pelos usuários quando os raios solares causam incômodo dentro da sala de aula. O valor considerado para ativação do dispositivo de controle solar foi de 120 W/m².

3.4 Simulação do cenário atual e das estratégias de arrefecimento passivo

3.4.1 Considerações iniciais

Nesta secção são apresentadas todas as simulações realizadas no âmbito desta dissertação. Todas as simulações foram efetuadas numa base anual, de 1 de janeiro até 31 de dezembro. Os dados climáticos foram importados através de um ficheiro climático que continha as informações disponibilizadas pelo INMET [56] através da plataforma PROJETEEE [55].

Inicialmente, o cenário atual da edificação foi simulado em 4 variantes: a primeira (simulação S0.1), é o cenário atual com uma ventilação contínua de 0,5 h⁻¹ e sem o sistema de proteção solar (cortinas internas nas janelas traseiras do edifício), a segunda (simulação S0.2) mantém a estratégia de ventilação, porém esta simulação conta com o sistema de proteção solar. As

simulações S0.3 e S0.4 seguem a mesma lógica que as anteriores, porém a ventilação é alterada para $1,0 \text{ h}^{-1}$.

As simulações S1, S2, S3 e S4 são referentes à edificação com a introdução de três estratégias de arrefecimento passivo: ventilação (noturna e diurna pontual), cobertura verde, e pintura refletante nas paredes externas. As demais simulações (S5, S6, S7, S8.1 e S8.2) contemplam variadas combinações entre as estratégias de arrefecimento passivo. Todas as simulações que apresentavam alguma alteração do cenário atual foram executadas para o pior caso, ou seja, o caso da simulação S0.1 (ventilação contínua de $0,5 \text{ h}^{-1}$ e sem o sistema de proteção solar). A Tabela 3-5 apresenta um resumo com todas as simulações estudadas e os parâmetros variados.

Tabela 3-5: Parâmetros variáveis nas simulações

Simulação	Ventilação	Cobertura Verde	Pintura Refletante	Proteção Solar
S0.1	Contínua			
S0.2	Contínua			X
S0.3	Contínua			
S0.4	Contínua			X
S1	Noturna			
S2	Noturna + D.P.			
S3	Contínua	X		
S4	Contínua		X	
S5	Noturna + D.P.	X		
S6	Noturna + D.P.		X	
S7	Contínua	X	X	
S8.1	Noturna + D.P.	X	X	
S8.2	Noturna + D.P.	X	X	X

3.4.2 Ventilação natural

A abordagem inicial consistiu em uma estratégia que tomasse proveito dos conceitos de ventilação natural. Para tal, duas propostas foram testadas: a primeira proposta foi utilizar a técnica de ventilação noturna (simulação S1) e a segunda também contemplou a mesma ventilação noturna, mas desta vez aliada com uma técnica de ventilação de conforto diurna pontual (simulação S2).

Na simulação S1, a ventilação contínua de $0,5 \text{ h}^{-1}$ foi mantida durante todo o dia, porém foi aplicada uma ventilação noturna adicional de $2,5 \text{ h}^{-1}$ no período entre as 21:10h e as 07:00h. Na simulação S2 ocorreu da mesma forma, mas além da ventilação contínua de $0,5 \text{ h}^{-1}$ e a ventilação noturna de $2,5 \text{ h}^{-1}$ também foi aplicada uma ventilação diurna pontual de $2,5 \text{ h}^{-1}$ entre os intervalos das aulas: das 10:00h às 10:20h, das 12:00h às 13:00h, das 15:30h às 15:50h e das 18:20h às 18:40h. A ventilação foi introduzida no software DesignBuilder por meio de uma agenda do tipo compacta.

3.4.3 Cobertura verde

Na simulação S3 a cobertura existente em telha de fibrocimento foi substituída por uma cobertura vegetal do tipo extensivo, por ter menor custo inicial e exigir menos manutenção que a cobertura verde de caráter intensivo. O software exige uma caracterização dessa nova cobertura, ou seja, solicita que várias características relacionadas com a cobertura verde sejam definidas pelo utilizador. Neste estudo foi optado por utilizar os valores de referência sugeridos pelo próprio *DesignBuilder*, que estão dispostos em um modelo que é descarregado automaticamente junto com a interface. Essas informações estão apresentadas na Tabela 3-6.

Tabela 3-6: Parâmetros de cálculo da cobertura verde que foi simulada no *DesignBuilder*

Parâmetros	
Vegetação	Plantas herbáceas
Espessura da camada de solo (m)	0,200
Condutibilidade do solo seco (W/m . K)	0,300
Calor específico do solo seco (J/kg . K)	1000,000
Massa volúmica do solo seco (kg/m³)	1000,000
Altura das Plantas (m)	0,100
Índice de área foliar (-)	5,000
Refletividade da folha (-)	0,220
Emissividade da folha (-)	0,950
Resistência estomática mínima (s/m)	100,000
Teor de umidade de saturação volumétrica da camada de solo (-)	0,500
Teor de umidade residual do volume da camada de solo (-)	0,010
Teor de umidade volumétrica inicial da camada de solo (-)	0,150
Absortância térmica (-)	0,900
Absortância solar (-)	0,700
Absortância visível (-)	0,700
Rugosidade (-)	Rugoso

3.4.4 Pintura refletiva

A última estratégia consistiu na aplicação de pintura refletiva em todas as paredes externas da edificação (simulação S4), por ser uma área consideravelmente grande e bastante atingida pela radiação solar. Portanto, para execução desta técnica na simulação, as características de emissividade e absorção solar do material de revestimento das paredes foram alteradas para que tivessem características mais refletivas. Os parâmetros modificados foram baseados no estudo [9], um resumo destes parâmetros está apresentado na Tabela 3-7.

Tabela 3-7: Parâmetros alterados nos materiais para caracterizar a pintura refletiva

Parâmetros		
Simulação	Original	Pintura Refletiva
Emissividade	0,900	0,600
Absorção solar	0,700	0,300
Absorção visível	0,700	0,300

3.5 Avaliação do conforto térmico

Para a avaliação do conforto térmico do ambiente interno das salas de aula utilizou-se o modelo adaptativo da norma europeia EN 15251 (2006) [12], considerando a categoria II, que é recomendada para atender pessoas com um nível médio de expectativa e indicada para reabilitações de edificações. A Figura 2-2 apresenta o gráfico da norma que evidencia os limites de conforto para cada uma das três categorias.

Como simplificação, neste trabalho considerou-se que as heterogeneidades devido ao efeito da radiação e que a velocidade do ar são negligenciáveis, e, portanto, a temperatura do ar interno pode ser considerada como uma boa aproximação da temperatura operativa. Portanto, a temperatura interna (T_i) foi considerada igual à temperatura operativa (T_{op}).

A utilização deste modelo de conforto pressupõe o cumprimento de determinadas premissas sobre a edificação. Neste estudo, todos os seguintes itens estão em conformidade:

- O espaço é equipado com janelas que se abrem para o exterior e com a possibilidade de serem prontamente abertas e ajustadas pelos ocupantes;
- Não há nenhum sistema de arrefecimento mecânico em operação no espaço;
- Métodos de baixa energia para controlar o ambiente interno são admitidos (ventiladores e persianas);
- Os ocupantes estão em atividade sedentária e podem se adaptar livremente utilizando o vestuário.

Os limites superior e inferior de conforto da categoria II para o período quente são estabelecidos através da Equação (3-1) e Equação (3-2), respectivamente.

$$T_{i \text{ máx}} = 0,33 \cdot T_{mp} + 18,8 + 3 \quad (3-1)$$

$$T_{i \text{ mín}} = 0,33 \cdot T_{mp} + 18,8 - 3 \quad (3-2)$$

Para o período frio, é possível utilizar os valores da temperatura de referência sugeridos pela norma. No caso das salas de aula, o limite superior corresponde ao limite mínimo do período quente, enquanto o limite inferior é de 20°C. Portanto, qualquer temperatura simulada que estiver fora destes limites (seja no período quente ou no período frio) é considerada um ponto de desconforto térmico.

Os pontos de desconforto foram quantificados através de dois índices de desconforto, ID_1 e ID_2 , estabelecidos através da Equação (3-3) e Equação (3-4), respectivamente. O índice ID_1 (%) representa a percentagem de tempo ocupado em que o edifício permanece desconfortável termicamente, e foi calculado a partir do total de horas em desconforto dividido pelo total de horas ocupadas. Já o ID_2 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$) mede o somatório das diferenças entre os limites de conforto e a temperatura simulada, quando a temperatura está fora da zona de conforto.

$$ID_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{n}^{\circ} \text{ de horas em desconforto})}{N} \quad (3-3)$$

$$ID_2 = \sum_{i=1}^N (T_i - T_{\text{limite (inf,sup)}})_i \quad (3-4)$$

Em que:

T_i	($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura interna da sala de aula
N	(h)	Número de horas com ocupação das salas de aula

4. Apresentação e discussão dos resultados

4.1 Considerações iniciais

Os resultados das simulações consideradas nesta dissertação foram divididos em duas partes: a primeira conta com as simulações referentes ao edifício existente, no qual as únicas variáveis são o valor da ventilação contínua ($0,5 \text{ h}^{-1}$ ou $1,0 \text{ h}^{-1}$) e o dispositivo de controle solar (com ou sem); a segunda apresenta os resultados das simulações com inclusão de alterações relativamente ao cenário base, ou seja, as simulações com as estratégias de arrefecimento passivo individualmente e combinadas entre elas.

Para cada simulação são expostos os dados de temperaturas internas e, a partir desses valores, o cálculo de dois índices de desconforto térmico. Além destes resultados, também é apresentada a representação gráfica da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251, mas apenas para a situação mais crítica (S0.1) e para a situação menos crítica (S8.2), tendo por critério o sobreaquecimento. Optou-se por esta abordagem para não tornar a apresentação dos resultados demasiado repetitiva, uma vez que os dois índices de desconforto já sintetizam a aplicação deste modelo de conforto térmico. Entretanto os gráficos referentes ao restante das simulações estão apresentados no anexo 1 da dissertação.

Todas as análises de simulações apresentadas nas seguintes subseções consideram apenas os períodos em que as salas de aula estavam ocupadas.

4.2 Simulações do edifício existente

4.2.1 Simulação S0.1

Como mencionado anteriormente (Tabela 3-5), a simulação S0.1 apresenta o bloco M sem nenhuma alteração, sem o sistema de proteção solar (cortinas) e com uma infiltração contínua de ar de $0,5 \text{ h}^{-1}$. Esta combinação dos parâmetros torna a simulação S0.1 como a situação mais crítica do estudo em relação ao sobreaquecimento, pois trata-se do cenário em que ocorrem menos perdas de calor por ventilação e maiores ganhos solares. A Figura 4-1 apresenta a variação das temperaturas internas nas salas do pavimento térreo e do primeiro pavimento ao longo do ano.

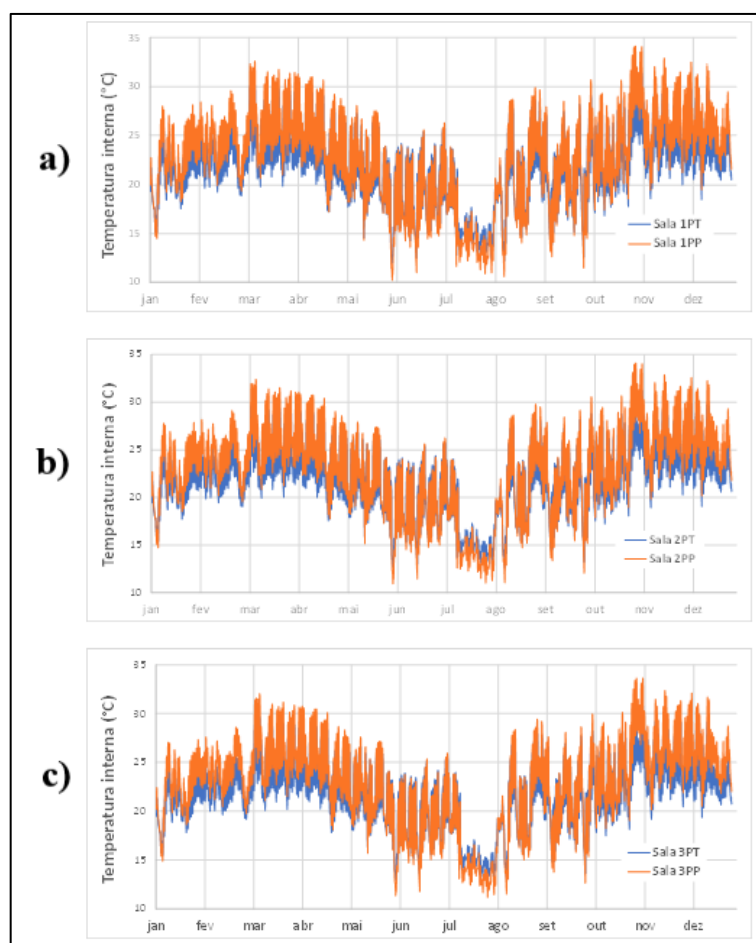


Figura 4-1: Temperatura do ar nas salas de aula do pavimento térreo e do primeiro pavimento: a) sala de aula 1PT/PP, b) sala de aula 2PT/PP e c) sala de aula 3PT/PP

A Figura 4-2 apresenta a variabilidade da temperatura interna do ar durante o período de um ano para a simulação S0.1, através de um gráfico do tipo *boxplot*.

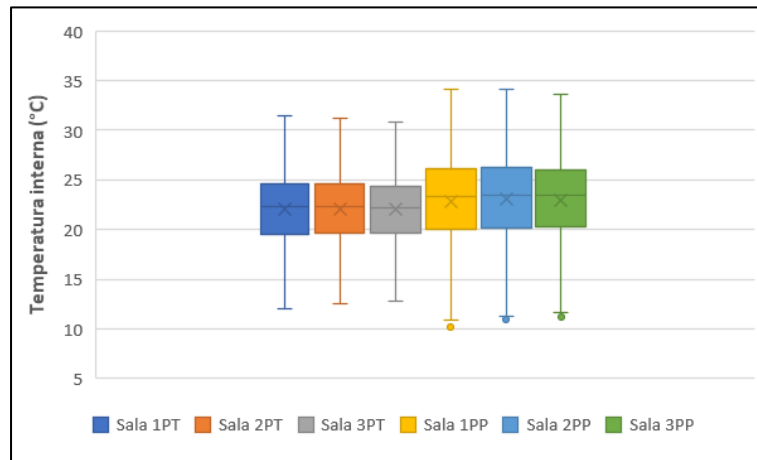


Figura 4-2: *Boxplot* da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S0.1

Analisando as Figuras 4-1 e 4-2, pode-se observar desde logo que os picos de temperatura superiores e inferiores certamente conduzem a situações de desconforto térmico dentro das salas de aula, tanto para a sensação de calor, como para sensação de frio. Outro aspecto que pode ser percebido é a clara diferença entre os picos de temperaturas das salas que estão localizadas no pavimento térreo e as salas do primeiro pavimento, sendo que os valores máximos de temperatura ocorrem sempre no pavimento superior. Esta situação ocorre por efeito das trocas de calor pela cobertura, que penalizam o piso superior, e pelas trocas de calor com o solo, que favorecem o piso térreo.

As Figuras, 4-3, 4-4 e 4-5 apresentam o resultado gráfico da aplicação do modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251, considerando apenas as temperaturas simuladas no período de ocupação das salas de aula: 1PT e 1PP, 2PT e 2PP e 3PT e 3PP, respectivamente.

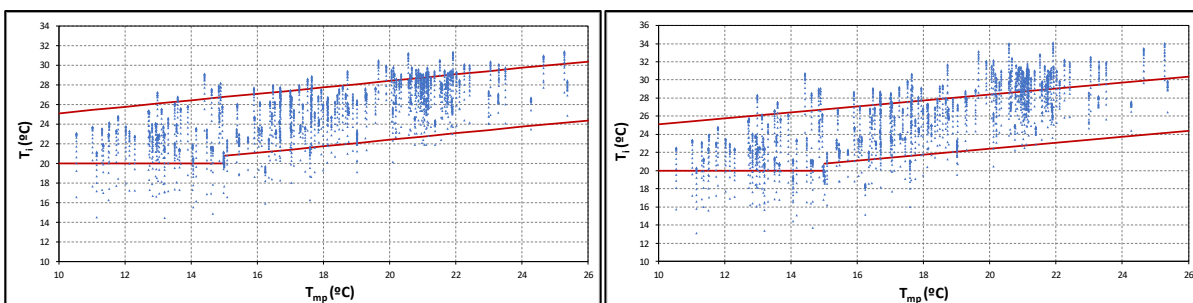


Figura 4-3: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para a sala de aula 1PT (esquerda) e sala de aula 1PP (direita) – simulação S0.1

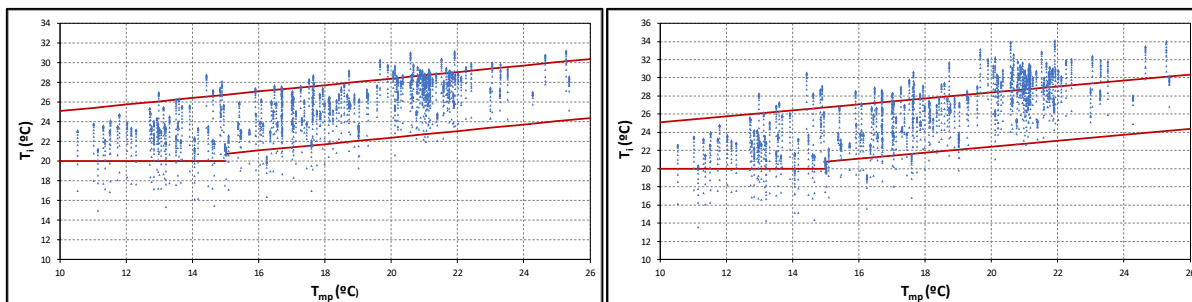


Figura 4-4: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para a sala de aula 2PT (esquerda) e sala de aula 2PP (direita) – simulação S0.1

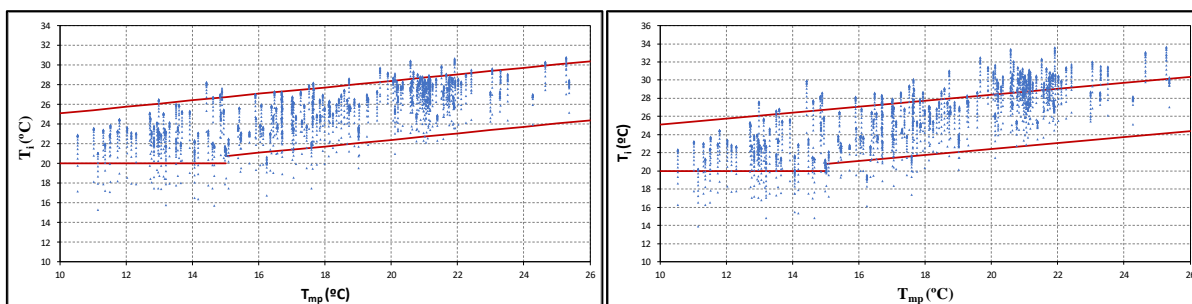


Figura 4-5: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para a sala de aula 3PT (esquerda) e sala de aula 3PP (direita) – simulação S0.1

Através da análise das Figuras, 4-3, 4-4 e 4-5 é perceptível que a mancha de pontos simulados fora da zona de conforto, proposta pela norma EN 15251, é significativamente maior nas salas do primeiro pavimento, quando comparadas com as salas do pavimento térreo. Porém, é importante realçar que todas as salas de aula apresentam níveis preocupantes de desconforto térmico, evidenciando a necessidade melhorar o seu desempenho e, portanto, confirmando a relevância do estudo que se realizou nesta dissertação.

O gráfico apresentado na Figura 4-6 quantifica o desconforto térmico, referente à simulação S0.1 por meio do índice ID_1 (apresentado na secção 3.5), que caracteriza a percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula em estudo, tendo por base os dados horários resultantes da simulação anual.

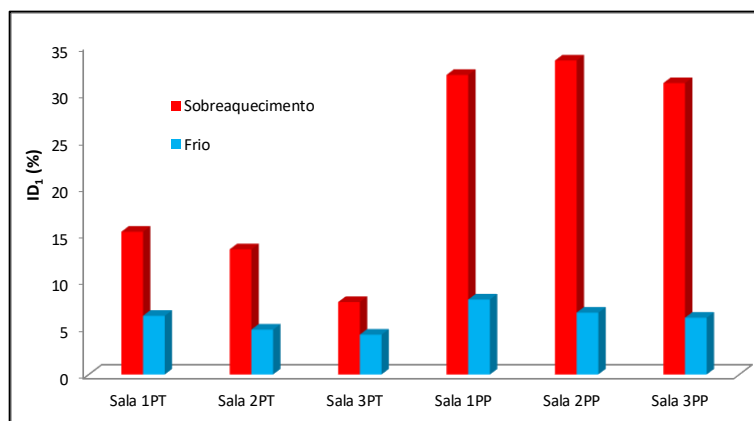


Figura 4-6: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.1

O gráfico da Figura 4-7 também é referente à simulação S0.1, mas apresenta o resultado do índice ID_2 (também apresentado na secção 3.5) para quantificar o desconforto térmico, evidenciando a quantidade de graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula em estudo, tendo por base os dados horários resultantes da simulação anual.

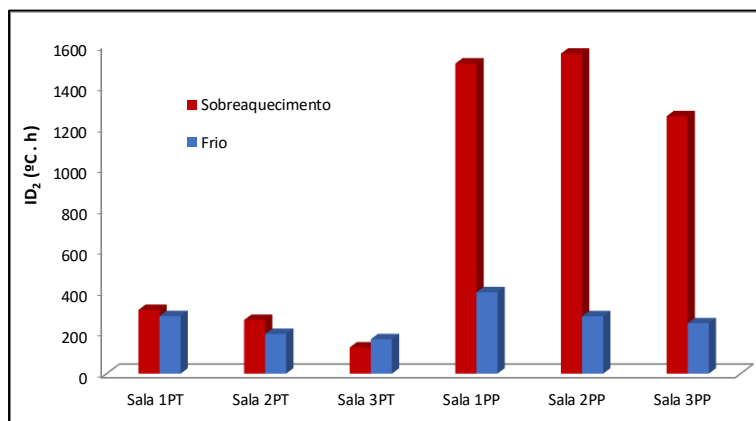


Figura 4-7: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.1

A Tabela 4-1 resume os dados apresentados na Figura 4-6 e Figura 4-7, para facilitar a visualização dos resultados do cálculo dos índices de desconforto.

Tabela 4-1: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S0.1

Sala de Aula	Índice de Desconforto			
	ID_1 (%)		ID_2 (°C . h)	
	Sobreaquecimento	Frio	Sobreaquecimento	Frio
1PT	15,21	6,25	309,69	279,78
2PT	13,34	4,78	260,86	192,79
3PT	7,72	4,24	126,94	167,14
1PP	31,92	7,99	1508,51	395,53
2PP	33,46	6,58	1556,77	278,81
3PP	31,05	6,05	1252,07	244,51

A Tabela 4-1 confirma os resultados preocupantes para o desconforto térmico sentido pelos ocupantes da edificação. Os valores são elevados para o sobreaquecimento, tanto para o índice ID_1 quanto para o índice ID_2 , especialmente para as salas de aula do primeiro pavimento. Nestas salas, o índice ID_1 atinge o valor de 33,46% (cerca de um terço do período de ocupação apresenta desconforto térmico) e o índice ID_2 chega a 1556,77 graus-hora na sala de aula 2PP.

Os valores de desconforto por frio são consideravelmente mais baixos e eventualmente controlados com pequenos ajustes no vestuário dos ocupantes, portanto não são analisados no presente estudo.

4.2.2 Simulação S0.2

A simulação S0.2 apenas difere da S0.1 em relação ao sistema de proteção solar, o qual está ativo neste cenário. A Figura 4-8 apresenta a variabilidade da temperatura interna do ar durante o período de um ano para a simulação S0.2 através de um gráfico do tipo *boxplot*.

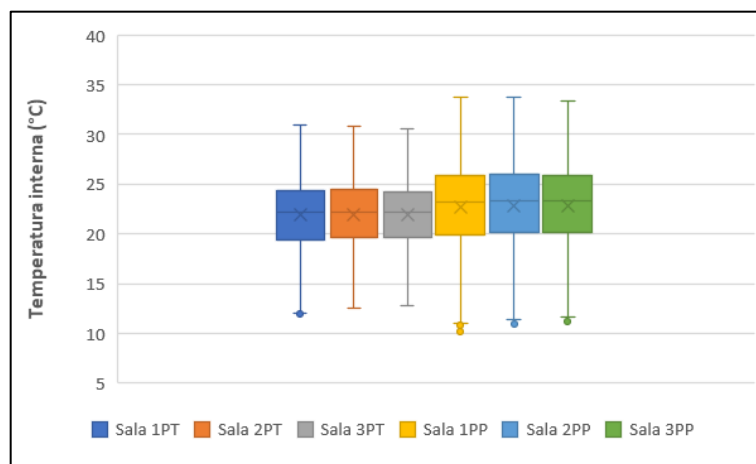


Figura 4-8: *Boxplot* da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S0.2

Analisando a Figura 4-8 e comparando com a Figura 4-2 (simulação S0.1), observa-se que, como seria expectável, as temperaturas internas de todas as salas de aula sofreram uma pequena redução por causa da utilização do sistema de proteção solar. Observa-se ainda que as salas do primeiro pavimento continuam a apresentar temperaturas de pico mais acentuadas.

Os índices de desconforto térmico ID_1 e ID_2 , referentes à simulação S0.2, são apresentados pelos gráficos presentes na Figura 4-9 e Figura 4-10, respectivamente.

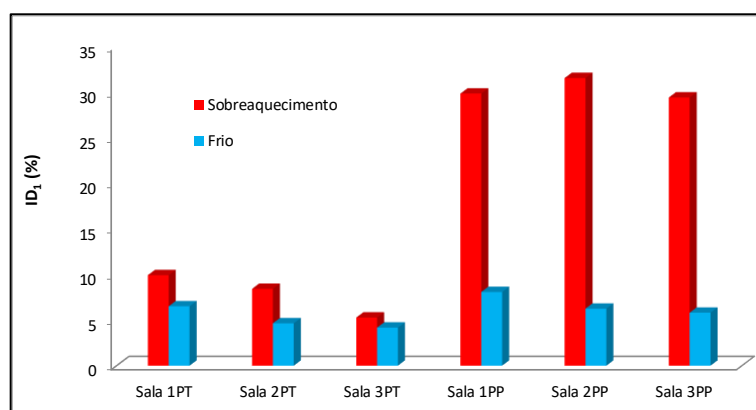


Figura 4-9: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.2

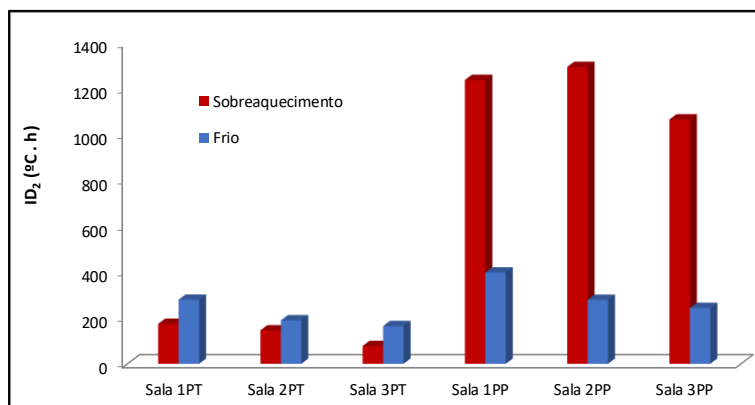


Figura 4-10: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.2

A Tabela 4-2 resume os dados apresentados na Figura 4-9 e Figura 4-10.

Tabela 4-2: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S0.2

Sala de Aula	Índice de Desconforto			
	ID_1 (%)		ID_2 (°C . h)	
	Sobreaquecimento	Frio	Sobreaquecimento	Frio
1PT	9,93	6,52	174,39	280,04
2PT	8,42	4,65	146,16	189,75
3PT	5,28	4,18	77,79	164,77
1PP	29,85	8,09	1240,17	399,08
2PP	31,55	6,25	1296,88	279,34
3PP	29,41	5,82	1067,78	243,94

Comparando os resultados da Tabela 4-2 com os resultados da Tabela 4-1 (S0.1), é perceptível que apenas utilizando o sistema de proteção solar é possível obter uma redução no desconforto térmico por sobreaquecimento em todas as salas de aula. Assim, a utilização de um sistema de proteção solar pode originar a redução de até 5,28% da percentagem de desconforto (sala de aula 1PT) e de até 268,34 graus-hora de desconforto (sala de aula 1PP). Nesta simulação pode-se perceber que o dispositivo de controle solar é mais eficiente nas salas do pavimento térreo, pois os ganhos solares ocorrem apenas pelas fachadas, já que a cobertura não está exposta como acontece na cobertura do primeiro pavimento.

4.2.3 Simulação S0.3

A simulação S0.3 difere da S0.1 apenas em relação ao valor da infiltração de ar na edificação, uma vez que este cenário conta com uma ventilação contínua de $1,0 \text{ h}^{-1}$. A Figura 4-11 apresenta a variabilidade da temperatura interna do ar durante o período de um ano para a simulação S0.3 através de um gráfico do tipo *boxplot*.

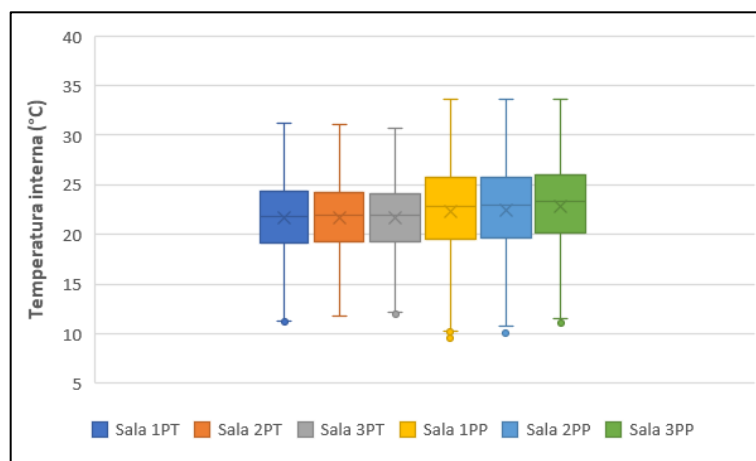


Figura 4-11: *Boxplot* da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S0.3

Observando a Figura 4-11, em comparação com a simulação S0.1 (Figura 4-2), pode-se perceber que as temperaturas de todas as salas sofreram uma diminuição por efeito do aumento da ventilação para $1,0 \text{ h}^{-1}$. As temperaturas de pico, para sobreaquecimento, continuam mais acentuadas no primeiro pavimento do que no pavimento térreo.

Os índices de desconforto térmico ID_1 e ID_2 , referentes à simulação S0.3, são apresentados pelos gráficos presentes na Figura 4-12 e Figura 4-13, respectivamente.

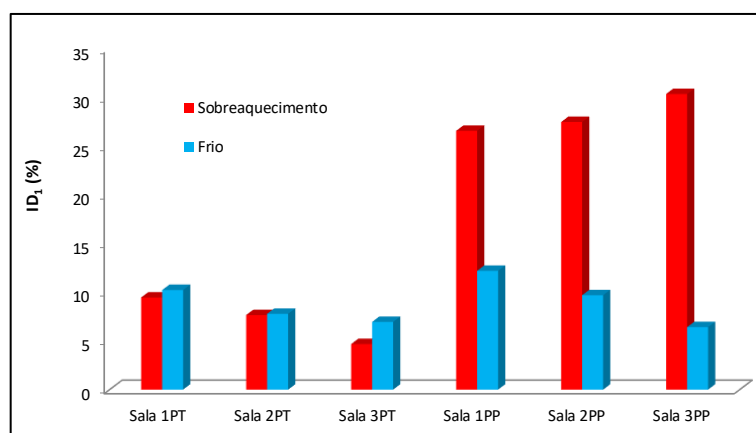


Figura 4-12: Percentagem de desconforto térmico por hora em cada sala de aula na simulação S0.3

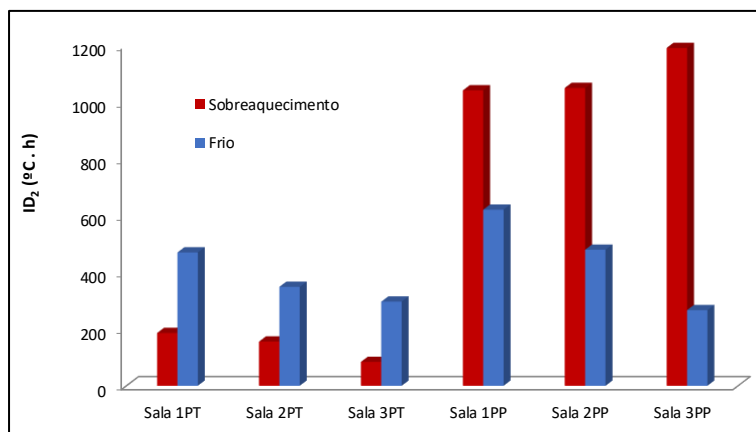


Figura 4-13: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.3

A Tabela 4-3 resume os dados apresentados na Figura 4-12 e Figura 4-13.

Tabela 4-3: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S0.3

Sala de Aula	Índice de Desconforto			
	ID_1 (%)		ID_2 (°C . h)	
	Sobreaquecimento	Frio	Sobreaquecimento	Frio
1PT	9,46	10,23	186,00	470,06
2PT	7,65	7,79	155,70	348,69
3PT	4,68	6,95	84,07	296,56
1PP	26,57	12,20	1041,52	620,87
2PP	27,47	9,69	1049,87	479,57
3PP	30,35	6,42	1190,98	266,44

Comparando os resultados da Tabela 4-3 e da Tabela 4-1 (S0.1) observa-se que a alteração no valor da ventilação gerou uma queda no desconforto térmico por sobreaquecimento. Através do aumento da ventilação foi possível reduzir até 5,99% das horas de desconforto (sala de aula 2PP) e de até 506,90 graus-hora de desconforto (sala de aula 2PP).

4.2.4 Simulação S0.4

A simulação S0.4 difere da S0.1 em relação ao valor da infiltração de ar na edificação e à presença do sistema de proteção solar. Desta forma, neste cenário a ventilação considerada é contínua de $1,0 \text{ h}^{-1}$ e o sistema de proteção solar está ativo. A Figura 4-14 apresenta a variabilidade da temperatura interna do ar durante o período de um ano para a simulação S0.4 através de um gráfico do tipo *boxplot*.

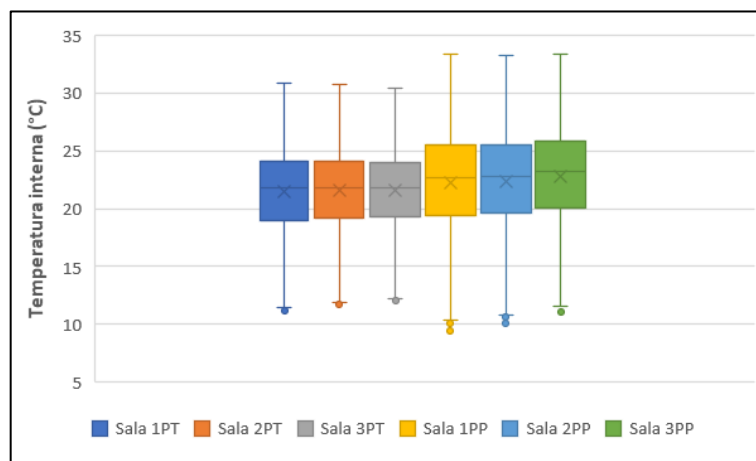


Figura 4-14: *Boxplot* da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S0.4

Quando a Figura 4-14 é comparada com a Figura 4-2, referente a simulação S0.1, observa-se que as temperaturas sofreram uma diminuição considerável por conta do efeito combinado da ventilação de $1,0 \text{ h}^{-1}$ e do sistema de proteção solar. O primeiro pavimento continua a apresentar temperaturas de pico, para sobreaquecimento, mais acentuadas que o pavimento térreo.

Os índices de desconforto térmico ID_1 e ID_2 , referentes à simulação S0.4, são apresentados nos gráficos presentes na Figura 4-15 e Figura 4-16, respectivamente.

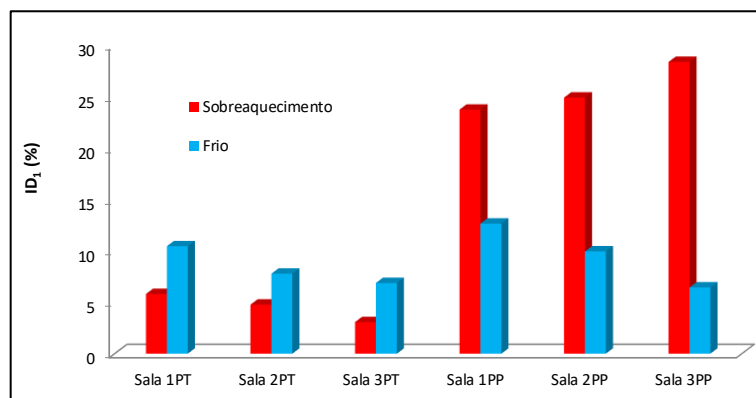


Figura 4-15: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.4

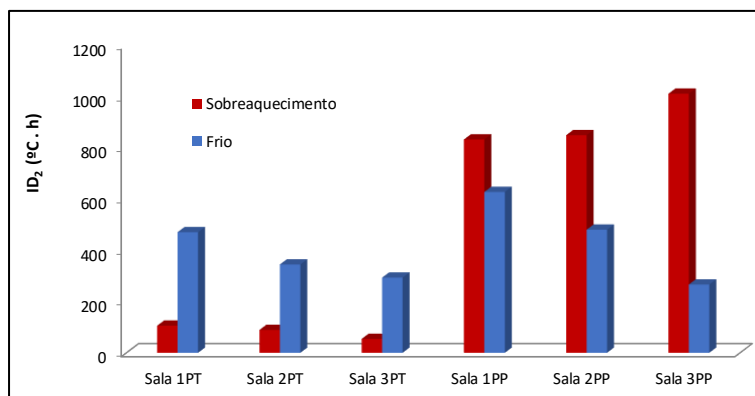


Figura 4-16: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S0.4

A Tabela 4-4 resume os dados apresentados na Figura 4-15 e Figura 4-16.

Tabela 4-4: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S0.4

Sala de Aula	Índice de Desconforto			
	ID_1 (%)		ID_2 (°C . h)	
	Sobreaquecimento	Frio	Sobreaquecimento	Frio
1PT	5,82	10,46	105,85	470,64
2PT	4,78	7,79	89,23	344,48
3PT	3,07	6,89	54,35	293,44
1PP	23,76	12,67	832,68	627,73
2PP	24,93	9,96	849,39	480,52
3PP	28,41	6,45	1011,18	266,23

Comparando os resultados da Tabela 4-4 e da Tabela 4-1 (S0.1) observa-se que a alteração no valor da ventilação contínua combinada com a utilização do sistema de sombreamento provocou uma queda significativa no desconforto térmico por sobreaquecimento. Esta redução foi, obviamente, superior à registada aquando das alterações isoladas, simulações S0.2 e S0.3. Os resultados mais relevantes são a redução de até 9,39% das horas ocupadas em desconforto na Sala de Aula 1PT e de até 707,38 graus-hora de desconforto na Sala de Aula 2PP.

4.3 Simulações do edifício com as estratégias de arrefecimento passivo

Os resultados apresentados nesta subsecção são referentes às simulações que contam com a utilização das estratégias de arrefecimento passivo e algumas combinações entre elas. O objetivo consistiu em compará-las com o cenário mais crítico (simulação S0.1). Portanto, as simulações S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 e S8.1 são caracterizadas por conter alguma alteração para garantir o arrefecimento passivo da edificação (Tabela 3-5), mas todas elas apresentam uma taxa de ventilação contínua de $0,5 \text{ h}^{-1}$ e não contam com a presença do sistema de proteção solar, como na simulação S0.1 (cenário base). A única exceção é a simulação S8.2, cujo cenário base é a simulação S0.2, que também utiliza uma ventilação contínua de $0,5 \text{ h}^{-1}$, mas conta com o sistema de proteção solar ativo.

4.3.1 Simulação S1

A simulação S1 é caracterizada pela utilização da ventilação noturna (das 21:10h às 07:00h) de $2,5 \text{ h}^{-1}$ em conjunto com a ventilação contínua de $0,5 \text{ h}^{-1}$ existente. A Figura 4-17 apresenta a variabilidade da temperatura interna do ar durante o período de um ano para a simulação S1 através de um gráfico do tipo *boxplot*.

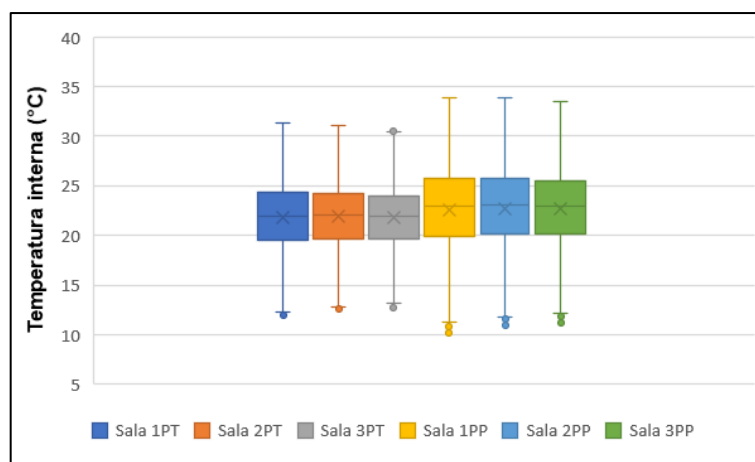


Figura 4-17: *Boxplot* da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S1

Observando a Figura 4-17 pode-se perceber que a ventilação noturna ocasionou uma redução pouco expressiva nas temperaturas internas das salas de aula, quando comparadas com a simulação S0.1 (Figura 4-2). As temperaturas de pico, para sobreaquecimento, continuam mais acentuadas no primeiro pavimento.

Os índices de desconforto térmico ID_1 e ID_2 , referentes à simulação S1, são apresentados nos gráficos presentes na Figura 4-18 e Figura 4-19, respectivamente.

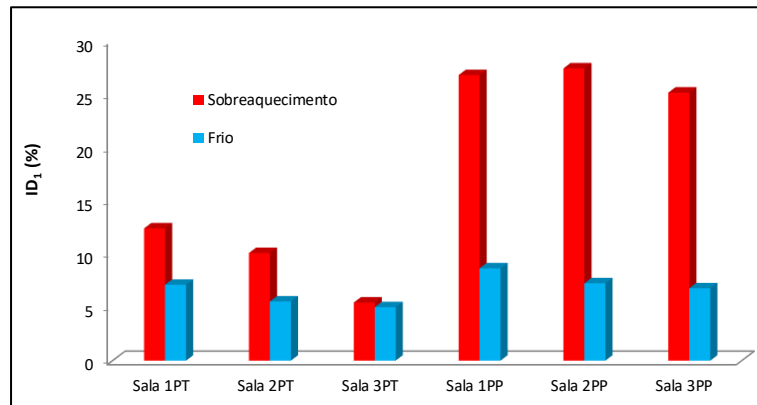


Figura 4-18: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S1

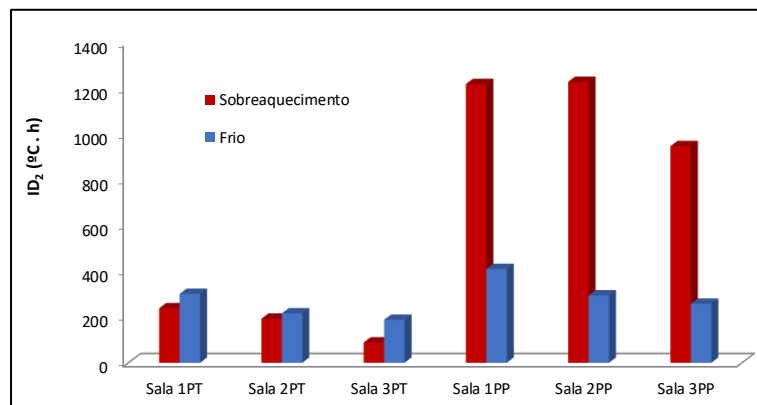


Figura 4-19: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S1

A Tabela 4-5 resume os dados apresentados na Figura 4-18 e Figura 4-19.

Tabela 4-5: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S1

Sala de Aula	Índice de Desconforto			
	ID_1 (%)		ID_2 (°C . h)	
	Sobreaquecimento	Frio	Sobreaquecimento	Frio
1PT	12,40	7,12	237,98	301,14
2PT	10,09	5,55	192,81	216,10
3PT	5,45	5,01	88,71	187,79
1PP	26,77	8,66	1218,29	410,18
2PP	27,41	7,25	1227,96	294,19
3PP	25,13	6,78	946,64	258,01

Comparando os resultados da Tabela 4-5 e da Tabela 4-1 (S0.1) observa-se que a utilização da estratégia de ventilação noturna resultou numa redução no desconforto térmico por sobreaquecimento e um aumento mínimo no desconforto térmico por frio no ambiente em estudo. Os resultados mais relevantes são a diminuição de até 6,05% das horas ocupadas em desconforto e de até 328,81 graus-hora de desconforto na Sala de Aula 2PP.

4.3.2 Simulação S2

A simulação S2 é caracterizada pela utilização da ventilação noturna de $2,5 \text{ h}^{-1}$ em conjunto com a ventilação diurna pontual (nos intervalos das aulas, das 10:00h às 10:20h, das 12:00h às 13:00h, das 15:30h às 15:50h e das 18:20h às 18:40h), também de $2,5 \text{ h}^{-1}$, além da ventilação contínua de $0,5 \text{ h}^{-1}$ existente. A Figura 4-20 apresenta a variabilidade da temperatura interna do ar durante o período de um ano para a simulação S2 através de um gráfico do tipo *boxplot*.

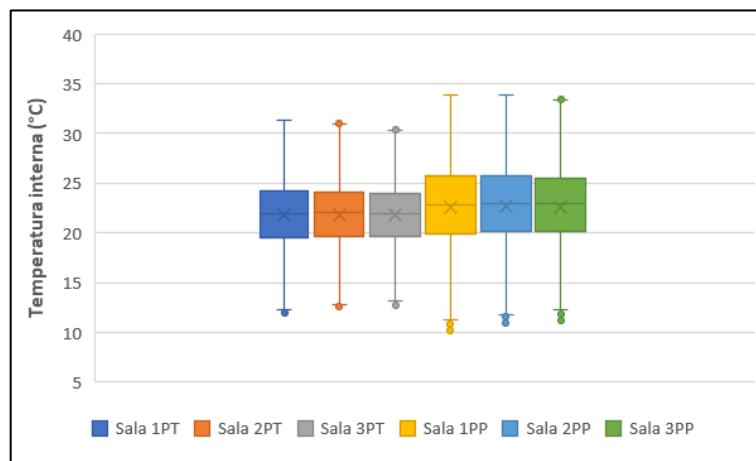


Figura 4-20: *Boxplot* da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S2

Quando a Figura 4-20 é comparada com a Figura 4-2, referente a simulação S0.1, fica evidente a redução das temperaturas internas de todas as salas de aula. O primeiro pavimento continua apresentando temperaturas de pico, para sobreaquecimento, mais acentuadas do que o pavimento térreo.

Os índices de desconforto térmico ID_1 e ID_2 , referentes à simulação S2, são apresentados nos gráficos presentes na Figura 4-21 e Figura 4-22, respectivamente.

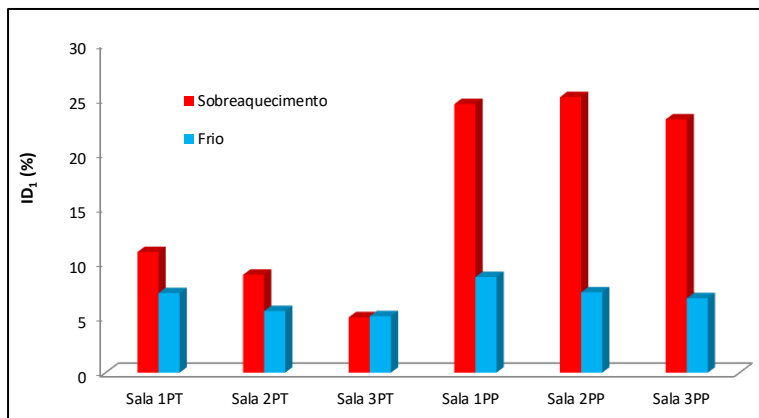


Figura 4-21: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S2

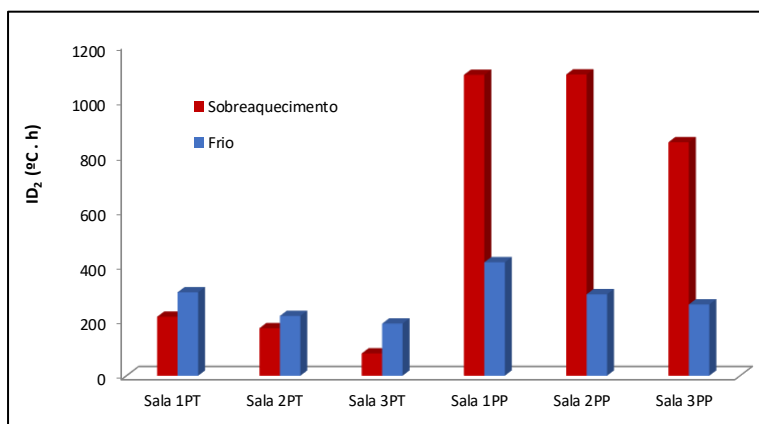


Figura 4-22: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S2

A Tabela 4-6 resume os dados apresentados na Figura 4-21 e Figura 4-22.

Tabela 4-6: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S2

Sala de Aula	Índice de Desconforto			
	ID_1 (%)		ID_2 (°C . h)	
	Sobreaquecimento	Frio	Sobreaquecimento	Frio
1PT	11,00	7,25	214,23	303,20
2PT	8,92	5,61	172,54	217,11
3PT	5,05	5,15	81,07	189,38
1PP	24,50	8,72	1093,30	412,15
2PP	25,13	7,32	1094,47	295,85
3PP	23,09	6,78	848,33	258,97

Analisando os resultados presentes na Tabela 4-6 e na Tabela 4-1 (S0.1) observa-se que a utilização da estratégia de ventilação noturna em conjunto com a ventilação diurna pontual causou uma diminuição no desconforto térmico por sobreaquecimento e um aumento reduzido do desconforto térmico por frio. Os resultados mais relevantes são a diminuição de até 8,33% das horas ocupadas em desconforto e de até 462,30 graus-hora de desconforto na Sala de Aula 2PP.

Como a simulação S2 teve um melhor desempenho na redução do desconforto térmico, quando comparada com a simulação S1, ela será a utilizada para as combinações com as outras estratégias de arrefecimento e será nomeada apenas de ventilação natural.

4.3.3 Simulação S3

A simulação S3 é caracterizada pela utilização da cobertura verde em substituição da cobertura existente no cenário base. A Figura 4-23 apresenta a variabilidade da temperatura interna do ar durante o período de um ano para a simulação S3 através de um gráfico do tipo *boxplot*.

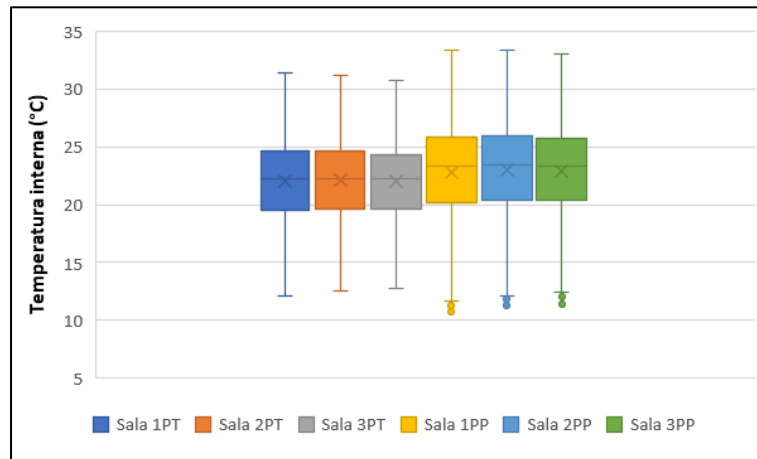


Figura 4-23: *Boxplot* da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S3

Analisando a Figura 4-23 e comparando com a Figura 4-2 (simulação S0.1) observa-se que as temperaturas sofreram uma redução mínima e continuam apresentando temperaturas de pico, para sobreaquecimento, mais acentuadas no primeiro pavimento.

Os índices de desconforto térmico ID_1 e ID_2 , referentes à simulação S3, são apresentados nos gráficos presentes na Figura 4-24 e Figura 4-25, respectivamente.

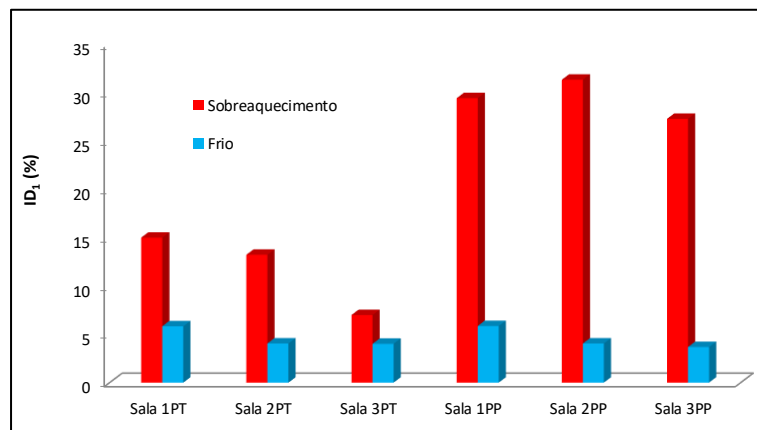


Figura 4-24: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S3

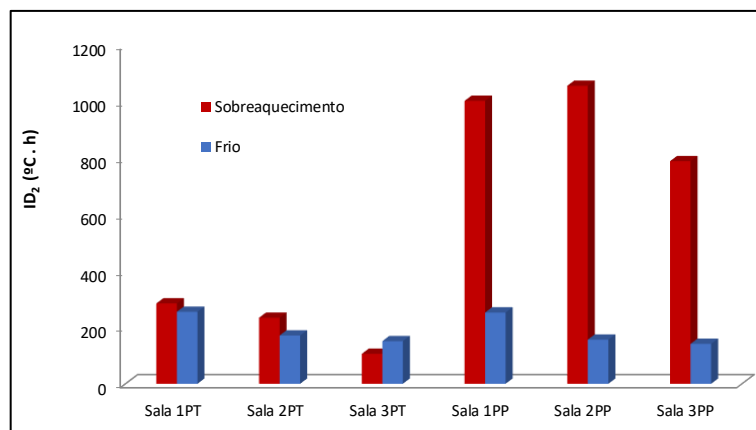


Figura 4-25: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S3

A Tabela 4-7 resume os dados apresentados na Figura 4-24 e Figura 4-25.

Tabela 4-7: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S3

Sala de Aula	Índice de Desconforto			
	ID_1 (%)		ID_2 (°C . h)	
	Sobreaquecimento	Frio	Sobreaquecimento	Frio
1PT	14,97	5,82	284,97	255,14
2PT	13,20	4,04	234,28	171,16
3PT	6,99	4,01	106,21	151,03
1PP	29,38	5,85	1003,29	252,62
2PP	31,28	4,04	1056,83	156,26
3PP	27,24	3,68	789,13	141,40

Observando os resultados presentes na Tabela 4-7 e na Tabela 4-1 (S0.1) pode-se perceber que o uso da estratégia de cobertura verde causou uma diminuição no desconforto térmico por sobreaquecimento e por frio. Os resultados demonstraram uma diminuição máxima de sobreaquecimento até 3,81% das horas ocupadas em desconforto na Sala de Aula 3PP e de até 505,22 graus-hora de desconforto por sobreaquecimento na Sala de Aula 1PP.

4.3.4 Simulação S4

A simulação S4 é caracterizada pela utilização da pintura refletante nas paredes externas da edificação. A Figura 4-26 apresenta a variabilidade da temperatura interna do ar durante o período de um ano para a simulação S4 através de um gráfico do tipo *boxplot*.

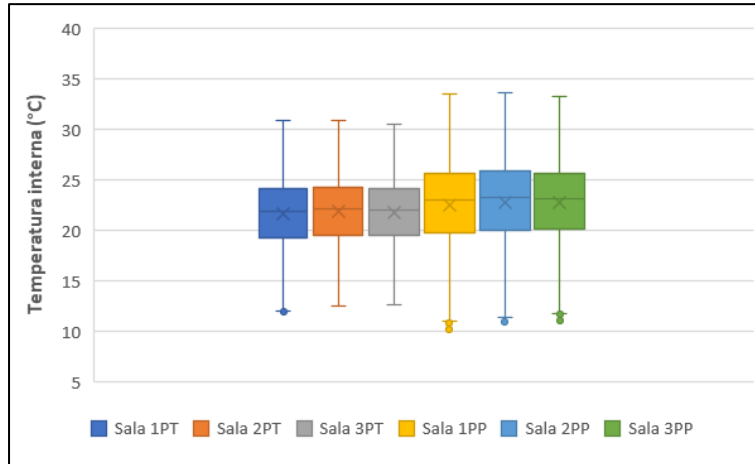


Figura 4-26: *Boxplot* da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S4

Observando a Figura 4-26 é perceptível que as temperaturas internas diminuíram, quando comparadas com a simulação S0.1 (Figura 4-2). As temperaturas de pico para sobreaquecimento continuam mais acentuadas no primeiro pavimento.

Os índices de desconforto térmico ID_1 e ID_2 , referentes à simulação S4, são apresentados nos gráficos presentes na Figura 4-27 e Figura 4-28, respectivamente.

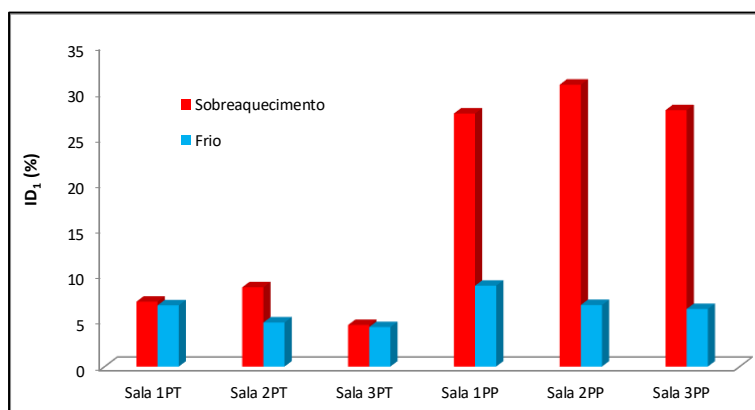


Figura 4-27: Percentagem de desconforto térmico por hora em cada sala de aula na simulação S4

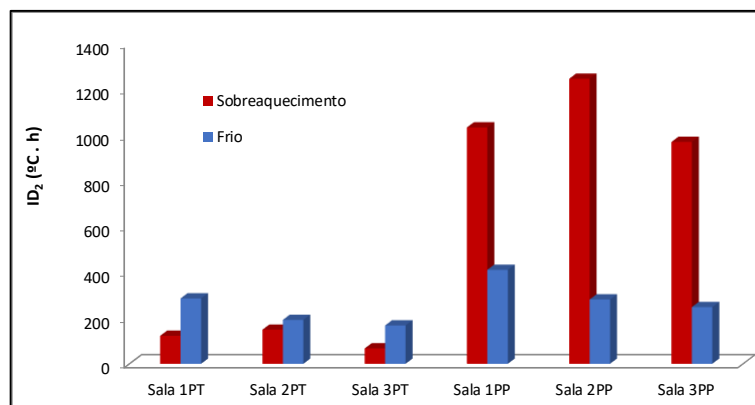


Figura 4-28: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S4

A Tabela 4-8 resume os dados apresentados na Figura 4-27 e Figura 4-28.

Tabela 4-8: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S4

Sala de Aula	Índice de Desconforto			
	ID_1 (%)		ID_2 (°C . h)	
	Sobreaquecimento	Frio	Sobreaquecimento	Frio
1PT	7,09	6,68	122,80	286,35
2PT	8,66	4,81	149,49	192,37
3PT	4,55	4,31	67,42	167,93
1PP	27,61	8,82	1035,63	411,67
2PP	30,75	6,72	1249,06	281,75
3PP	27,97	6,28	972,22	248,62

O partir dos resultados presentes na Tabela 4-8 e na Tabela 4-1 (S0.1) observa-se que a utilização da estratégia da pintura refletante provocou a diminuição do desconforto térmico por sobreaquecimento e um aumento mínimo do desconforto térmico por frio, com exceção da Sala de Aula 2PT que teve uma leve redução no ID_2 quanto ao desconforto térmico por frio. Os resultados mais relevantes são a diminuição de até 8,12% das horas ocupadas em desconforto na Sala de Aula 1PT e de até 472,88 graus-hora de desconforto na Sala de Aula 1PP.

4.3.5 Simulação S5

A simulação S5 apresenta a estratégia de ventilação natural combinada com a estratégia de cobertura verde. A Figura 4-29 apresenta a variabilidade da temperatura interna do ar durante o período de um ano para a simulação S5 através de um gráfico do tipo *boxplot*.

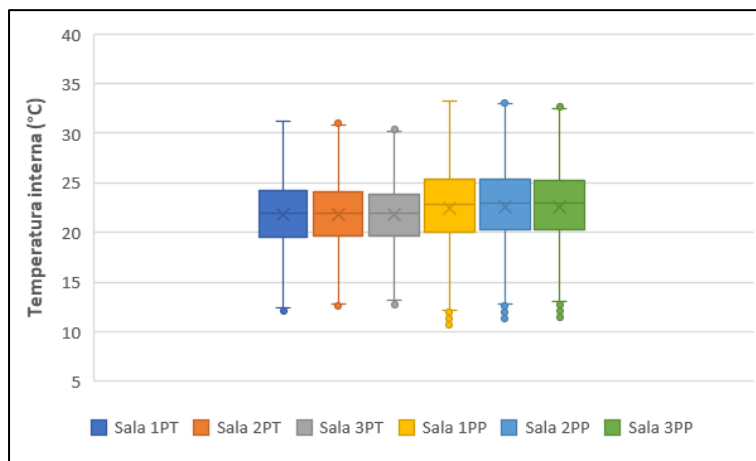


Figura 4-29: *Boxplot* da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S5

Analisando a Figura 4-29 e comparando com a Figura 4-2 (simulação S0.1) é possível perceber que a estratégia de ventilação natural combinada com a estratégia de cobertura verde causou uma redução nas temperaturas internas das salas de aula. Além disso pode-se identificar também que as temperaturas de pico para sobreaquecimento continuam mais acentuadas no primeiro pavimento.

Os índices de desconforto térmico ID_1 e ID_2 , referentes à simulação S5, são apresentados nos gráficos presentes na Figura 4-30 e Figura 4-31, respectivamente.

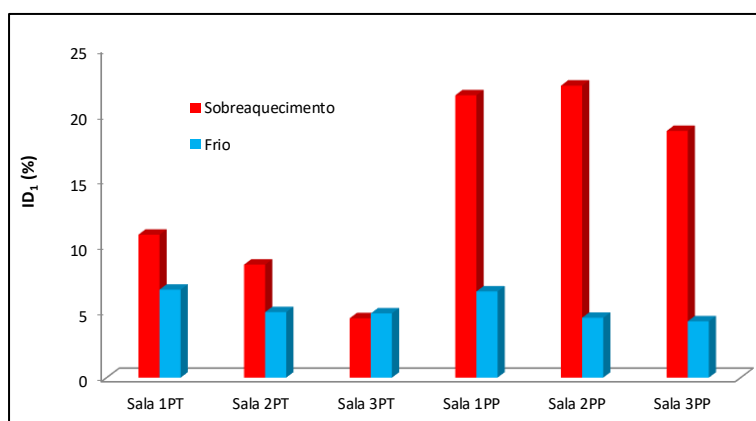


Figura 4-30: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S5

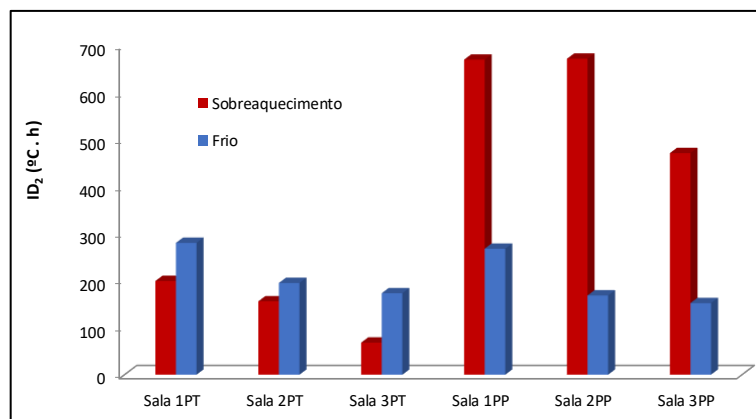


Figura 4-31: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S5

A Tabela 4-9 resume os dados apresentados na Figura 4-30 e Figura 4-31.

Tabela 4-9: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S5

Sala de Aula	Índice de Desconforto			
	ID_1 (%)		ID_2 (°C . h)	
	Sobreaquecimento	Frio	Sobreaquecimento	Frio
1PT	10,86	6,68	199,37	280,34
2PT	8,59	4,98	156,05	195,04
3PT	4,51	4,88	68,26	173,29
1PP	21,46	6,55	669,90	267,92
2PP	22,19	4,55	671,88	168,57
3PP	18,75	4,28	471,14	152,21

Comparando os resultados da Tabela 4-9 e da Tabela 4-1 (S0.1) observa-se que a utilização da estratégia de ventilação natural combinada com a estratégia de cobertura verde provocou a diminuição do desconforto térmico por sobreaquecimento e um ligeiro aumento do desconforto térmico por frio em todas as salas, com exceção das salas de aula 1PP, 2PP e 3PP, que também manifestaram redução do desconforto térmico por frio. Os resultados mais relevantes são a diminuição de até 12,30% das horas ocupadas em desconforto por sobreaquecimento na Sala de Aula 3PP e de até 884,89 graus-hora de desconforto por sobreaquecimento na Sala de Aula 2PP.

4.3.6 Simulação S6

A simulação S6 apresenta a estratégia de ventilação natural combinada com a estratégia de pintura refletante. A Figura 4-32 apresenta a variabilidade da temperatura interna do ar durante o período de um ano para a simulação S6 através de um gráfico do tipo *boxplot*.

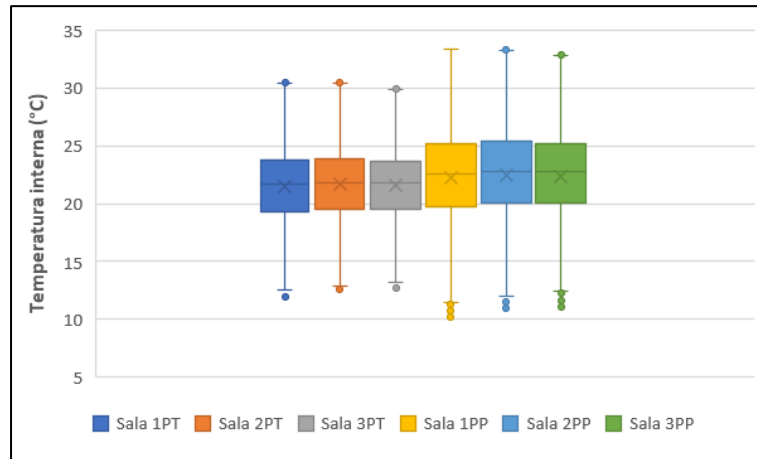


Figura 4-32: *Boxplot* da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S6

Quando a Figura 4-32 é comparada com a Figura 4-2, referente a simulação S0.1, observa-se que as temperaturas sofreram uma redução considerável e continuam apresentando temperaturas de pico, para sobreaquecimento, mais acentuadas no primeiro pavimento.

Os índices de desconforto térmico ID_1 e ID_2 , referentes à simulação S6, são apresentados nos gráficos presentes na Figura 4-33 e Figura 4-34, respectivamente.

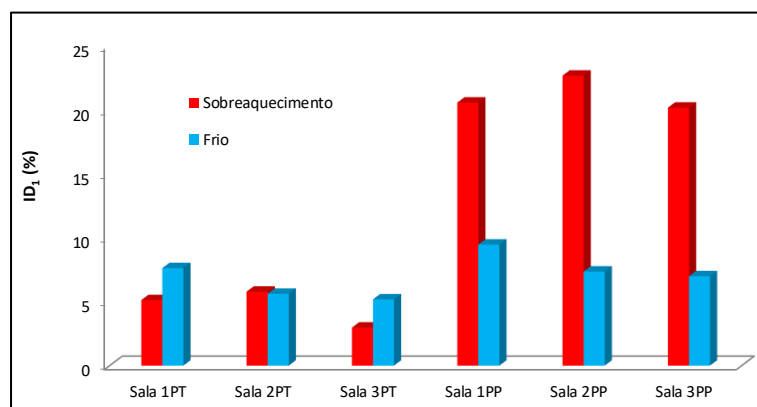


Figura 4-33: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S6

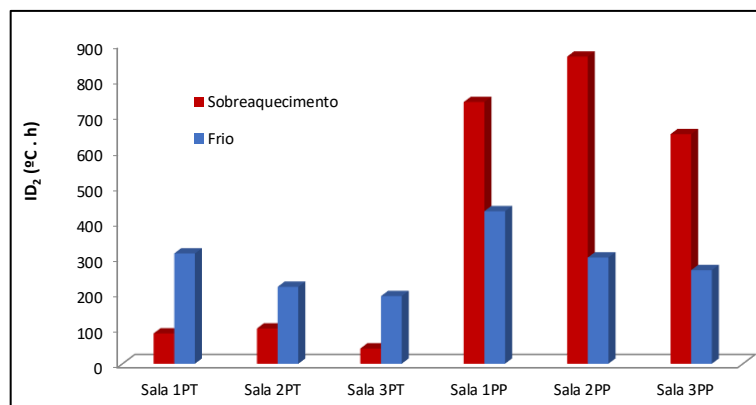


Figura 4-34: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S6

A Tabela 4-10 resume os dados apresentados na Figura 4-33 e Figura 4-34.

Tabela 4-10: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S6

Sala de Aula	Índice de Desconforto			
	ID_1 (%)		ID_2 (°C . h)	
	Sobreaquecimento	Frio	Sobreaquecimento	Frio
1PT	5,11	7,62	85,35	310,90
2PT	5,78	5,61	99,34	216,75
3PT	2,97	5,18	42,93	190,60
1PP	20,55	9,46	737,83	429,89
2PP	22,66	7,35	865,82	299,36
3PP	20,15	6,99	647,08	263,74

Observando os resultados da Tabela 4-10 e da Tabela 4-1 (S0.1) pode-se perceber que a utilização da estratégia de ventilação natural combinada com a estratégia de pintura refletante provocou a diminuição do desconforto térmico por sobreaquecimento e um aumento mínimo do desconforto térmico por frio. Os resultados mais relevantes são a diminuição de até 11,37% das horas ocupadas em desconforto por sobreaquecimento e de até 770,68 graus-hora de desconforto por sobreaquecimento na Sala de Aula 1PP.

4.3.7 Simulação S7

A simulação S7 apresenta a estratégia de cobertura verde combinada com a estratégia de pintura refletante. A Figura 4-35 apresenta a variabilidade da temperatura interna do ar durante o período de um ano para a simulação S7 através de um gráfico do tipo *boxplot*.

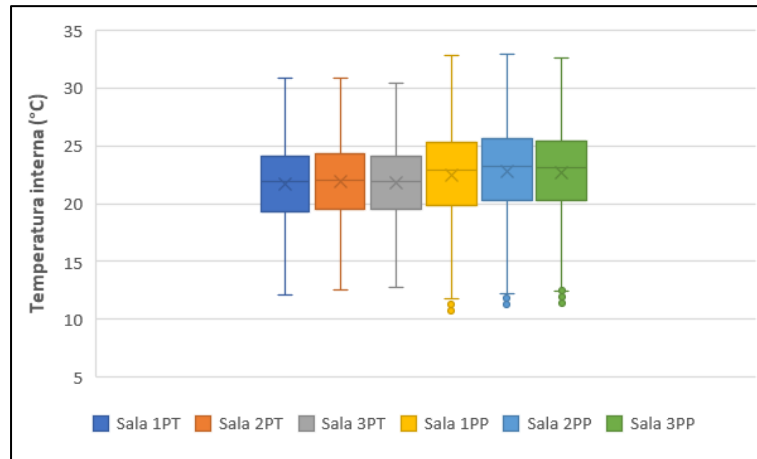


Figura 4-35: *Boxplot* da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S7

Realizando a comparação da Figura 4-35 com a Figura 4-2 (simulação S0.1) pode-se perceber que as temperaturas sofreram uma redução considerável. Essa redução é causada pela aplicação da estratégia de cobertura verde em conjunto com a estratégia de pintura refletante. Como nas simulações anteriores, as temperaturas de pico para sobreaquecimento continuam mais acentuadas no primeiro pavimento.

Os índices de desconforto térmico ID_1 e ID_2 , referentes à simulação S7, são apresentados nos gráficos presentes na Figura 4-36 e Figura 4-37, respectivamente.

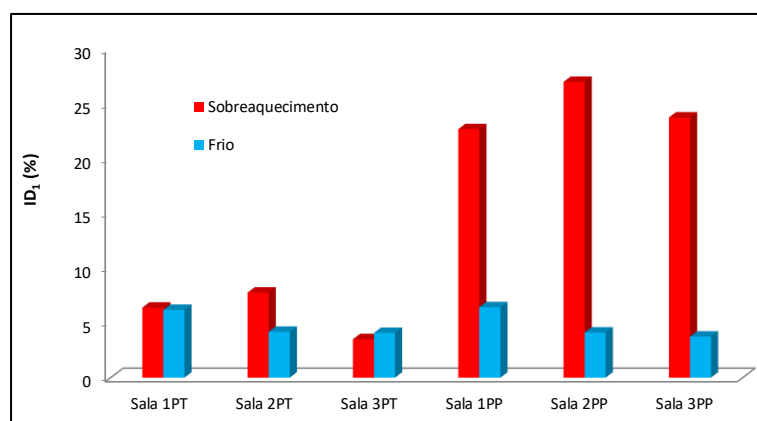


Figura 4-36: Percentagem de desconforto térmico cada sala de aula na simulação S7

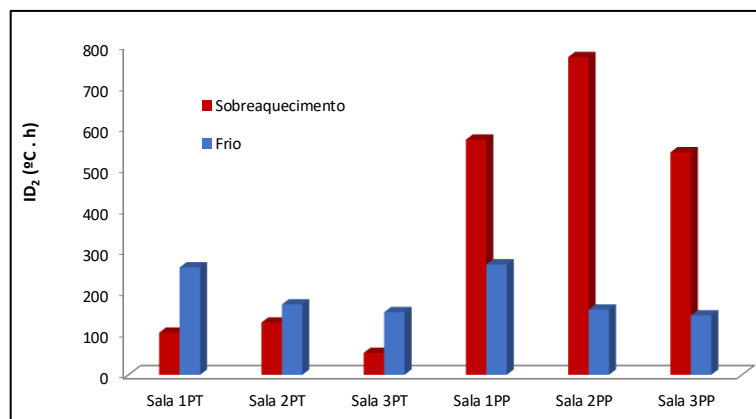


Figura 4-37: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S7

A Tabela 4-11 resume os dados apresentados na Figura 4-36 e Figura 4-37, para melhorar a visualização dos resultados da presente simulação.

Tabela 4-11: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S7

Sala de Aula	Índice de Desconforto			
	ID_1 (%)		ID_2 (°C . h)	
	Sobreaquecimento	Frio	Sobreaquecimento	Frio
1PT	6,38	6,18	102,17	260,67
2PT	7,75	4,18	126,71	170,67
3PT	3,51	4,08	53,17	151,92
1PP	22,66	6,42	571,13	267,99
2PP	26,97	4,11	771,57	158,12
3PP	23,73	3,74	540,30	144,22

Analisando os resultados presentes na Tabela 4-11 e na Tabela 4-1 (S0.1) observa-se que a utilização da estratégia de cobertura verde combinada com a estratégia de pintura refletante provocou uma diminuição no desconforto térmico por sobreaquecimento e uma ligeira redução do desconforto térmico por frio em todas as salas de aula. Os resultados mais relevantes são a diminuição de até 9,26% das horas ocupadas em desconforto por sobreaquecimento na Sala de Aula 1PP e de até 937,38 graus-hora de desconforto por sobreaquecimento também na Sala de Aula 1PP.

4.3.8 Simulação S8.1

A simulação S8.1 apresenta a combinação das três estratégias de arrefecimento passivo. A Figura 4-38 apresenta a variabilidade da temperatura interna do ar durante o período de um ano para a simulação S8.1 através de um gráfico do tipo *boxplot*.

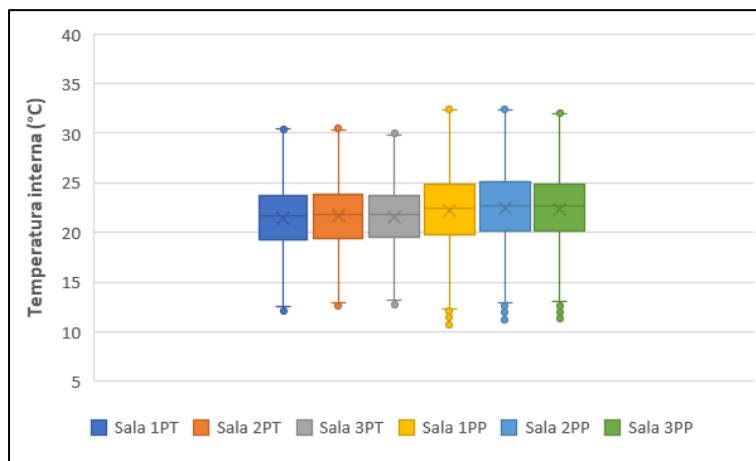


Figura 4-38: *Boxplot* da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S8.1

Analisando a Figura 4-38 em comparação com a simulação S0.1 (Figura 4-2) é perceptível que a combinação das três estratégias de arrefecimento passivo resultaram numa redução bastante expressiva da temperatura interna para todas as salas de aula. O primeiro pavimento continua tendo temperaturas de pico para sobreaquecimento mais elevadas que o pavimento térreo.

Os índices de desconforto térmico ID_1 e ID_2 , referentes à simulação S8.1, são apresentados nos gráficos presentes na Figura 4-39 e Figura 4-40, respectivamente.

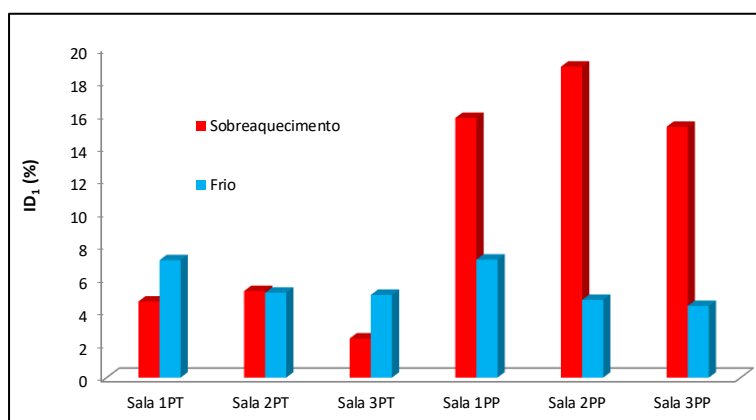


Figura 4-39: Percentagem de desconforto térmico por hora em cada sala de aula na simulação S8.1

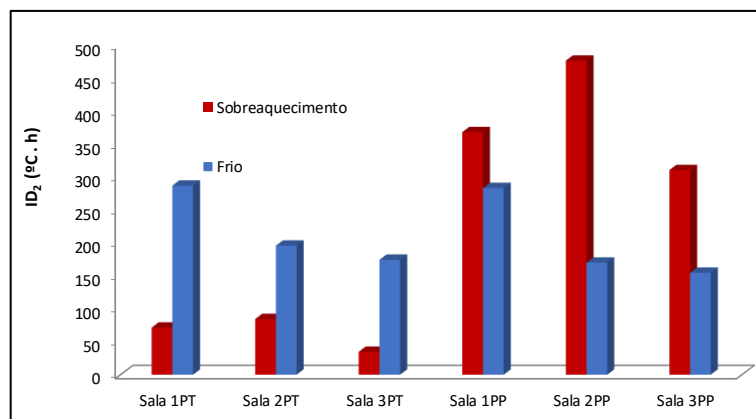


Figura 4-40: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S8.1

A Tabela 4-12 resume os dados apresentados na Figura 4-39 e Figura 4-40.

Tabela 4-12: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S8.1

Sala de Aula	Índice de Desconforto			
	ID_1 (%)		ID_2 (°C . h)	
	Sobreaquecimento	Frio	Sobreaquecimento	Frio
1PT	4,61	7,12	71,56	287,14
2PT	5,25	5,15	84,54	196,05
3PT	2,37	5,01	34,81	174,58
1PP	15,74	7,15	368,47	283,48
2PP	18,85	4,71	477,00	170,15
3PP	15,21	4,34	310,84	154,86

Comparando os resultados da Tabela 4-12 e da Tabela 4-1 (S0.1) observa-se que a combinação das três estratégias de arrefecimento passivo ocasionou uma queda considerável no desconforto térmico por sobreaquecimento em todas as salas, uma leve elevação no desconforto térmico por frio nas salas pavimento térreo e também uma leve redução no desconforto térmico por frio nas salas do primeiro pavimento. Os resultados mais relevantes são caracterizados pela redução de até 16,18% das horas ocupadas em desconforto por sobreaquecimento e de até 1140,04 graus-hora de desconforto por sobreaquecimento na Sala de Aula 1PP.

4.3.9 Simulação S8.2

A simulação S8.2 apresenta a combinação das três estratégias de arrefecimento passivo e o sistema de proteção solar. A Figura 4-41 apresenta a variabilidade da temperatura interna do ar durante o período de um ano para a simulação S8.2 através de um gráfico do tipo *boxplot*.

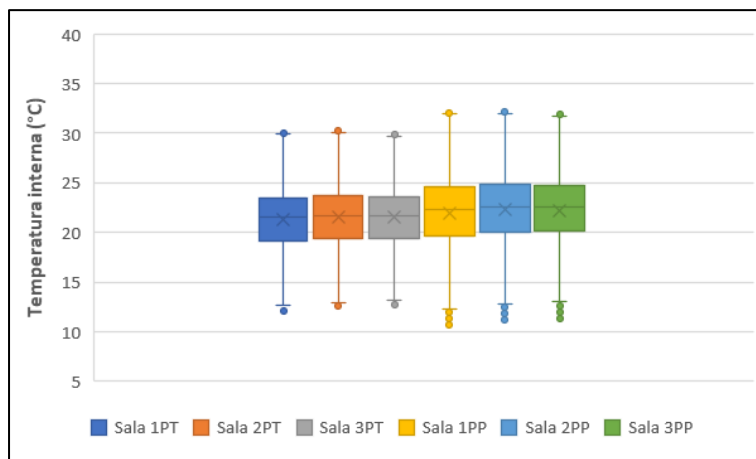


Figura 4-41: *Boxplot* da temperatura interna do ar em cada sala de aula na simulação S8.2

Analisando a Figura 4-41 em comparação com a simulação S0.1 (Figura 4-2) pode-se perceber que as temperaturas internas sofreram uma redução bastante expressiva em todas as salas de aula. Nesta simulação o primeiro pavimento também apresentou temperaturas de pico para sobreaquecimento mais elevadas do que o pavimento térreo.

As Figuras, 4-42, 4-43 e 4-44 apresentam as temperaturas simuladas apenas para o período de ocupação aplicadas ao modelo de conforto térmico proposto pela EN 15251 para as Salas de aula 1PT e 1PP, 2PT e 2PP e 3PT e 3PP, respectivamente.

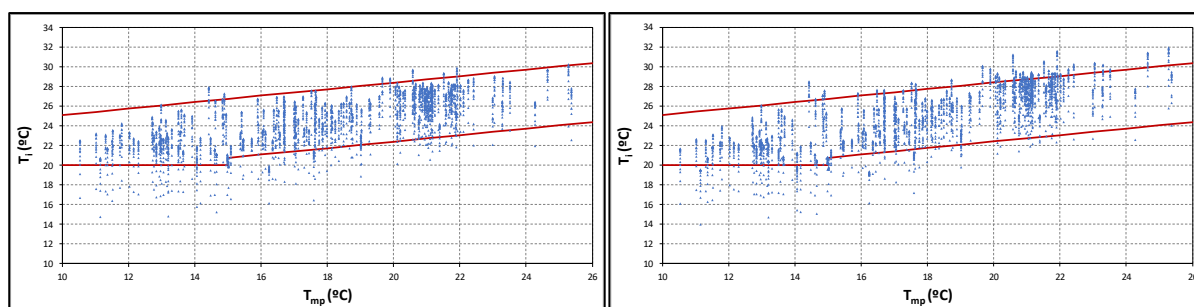


Figura 4-42: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para a sala de aula 1PT (esquerda) e sala de aula 1PP (direita) – simulação S8.2

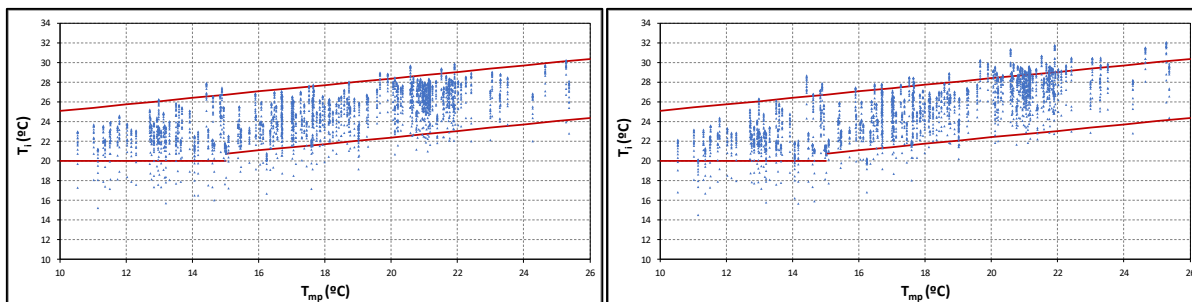


Figura 4-43: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para a sala de aula 2PT (esquerda) e sala de aula 2PP (direita) – simulação S8.2

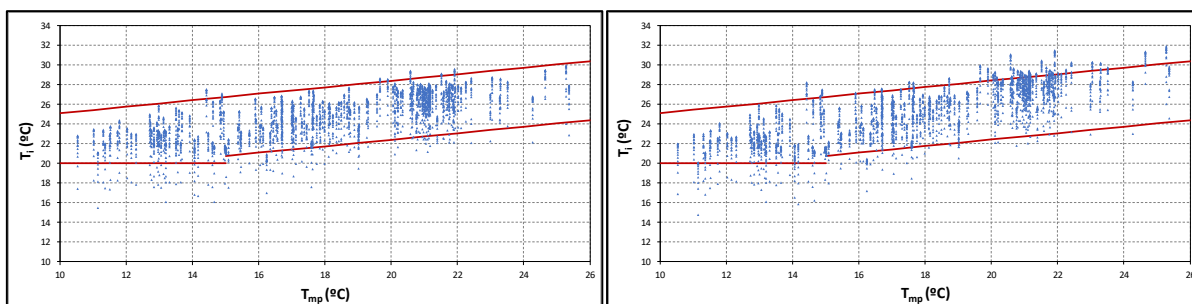


Figura 4-44: Avaliação do conforto térmico segundo a EN 15251 para a sala de aula 3PT (esquerda) e sala de aula 3PP (direita) – simulação S8.2

Através da comparação entre as Figuras, 4-42, 4-43 e 4-44 e as Figuras 4-3, 4-4 e 4-5, oriundas da simulação do cenário existente, é notório que a mancha de pontos simulados que estavam acima do limite de conforto superior diminuíram consideravelmente com a utilização das estratégias de arrefecimento passivo. Entretanto os pontos simulados que estavam abaixo do limite inferior tiveram um pequeno aumento. Também pode ser observado que mesmo depois da implementação das estratégias, as salas do primeiro pavimento continuam apresentando maior desconforto térmico por sobreaquecimento

Os índices de desconforto térmico ID_1 e ID_2 , referentes à simulação S8.2, são apresentados nos gráficos presentes na Figura 4-45 e Figura 4-46, respectivamente.

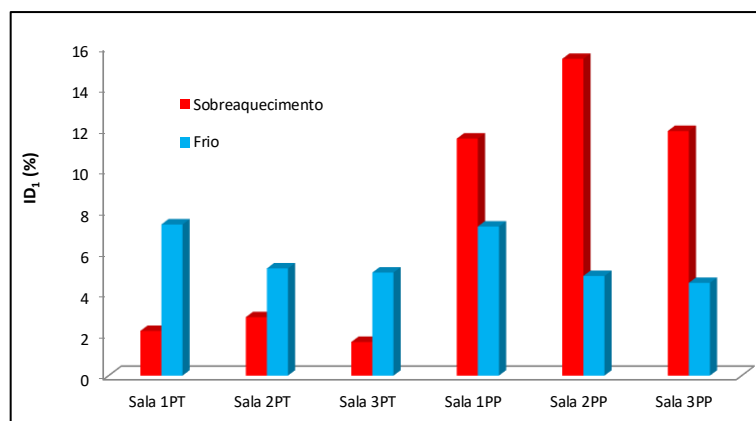


Figura 4-45: Percentagem de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S8.2

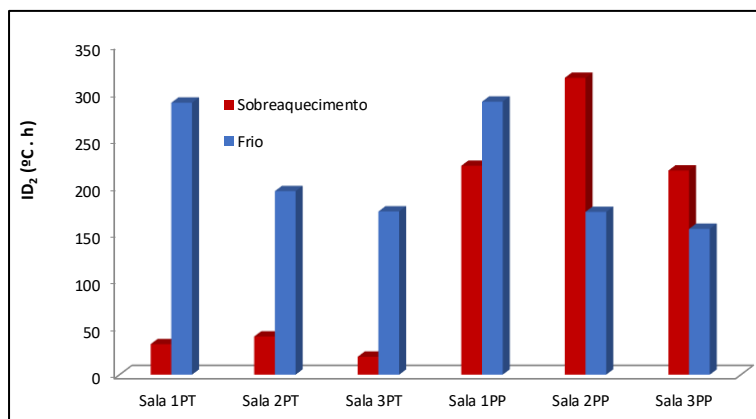


Figura 4-46: Graus-hora de desconforto térmico em cada sala de aula na simulação S8.2

A Tabela 4-13 resume os dados apresentados na Figura 4-45 e Figura 4-46, para melhorar a visualização dos resultados da presente simulação.

Tabela 4-13: Resumo dos índices quantificadores do desconforto térmico em cada sala de aula, simulação S8.2

Sala de Aula	Índice de Desconforto			
	ID_1 (%)		ID_2 (°C . h)	
	Sobreaquecimento	Frio	Sobreaquecimento	Frio
1PT	2,17	7,35	32,46	289,18
2PT	2,84	5,21	40,65	195,14
3PT	1,64	5,01	19,11	173,60
1PP	11,53	7,25	222,12	290,26
2PP	15,41	4,85	315,59	173,07
3PP	11,90	4,51	217,07	155,03

Analisando os resultados presentes na Tabela 4-13 e na Tabela 4-1 (S0.1) observa-se que a combinação das três estratégias de arrefecimento passivo com o sistema de proteção solar provocou uma queda considerável no desconforto térmico por sobreaquecimento em todas as salas, uma leve elevação no desconforto térmico por frio nas salas pavimento térreo e também uma leve redução no desconforto térmico por frio nas salas do primeiro pavimento. Os resultados mais relevantes são caracterizados pela redução de até 20,39% das horas ocupadas em desconforto por sobreaquecimento e de até 1286,39 graus-hora de desconforto por sobreaquecimento na Sala de Aula 1PP.

4.4 Discussão dos resultados

Dentre as simulações do edifício existente, S0.1, S0.2, S0.3 e S0.4 o caso mais crítico foi o da simulação S0.1, cenário em que a infiltração de ar era contínua de $0,5 \text{ h}^{-1}$ e não contava com o sistema de proteção solar. O caso menos crítico foi o da simulação S0.4, cenário em que a infiltração de ar era de $1,0 \text{ h}^{-1}$ e utilizava o sistema de proteção solar.

Sobre as estratégias de ventilação natural (S1 e S2), ambas causaram uma redução das temperaturas interiores comparativamente com a simulação S0.1, resultando numa melhoria de conforto térmico. Esta redução foi quase idêntica nos dois cenários, porém pouco expressiva. Apesar das pequenas diferenças, a estratégia de ventilação noturna em conjunto com a diurna pontual (S2) apresentou maior eficácia do que a estratégia de ventilação noturna (S1). Portanto, foi selecionado o cenário S2 para formar as combinações com as outras estratégias.

A estratégia de pintura refletiva (S4), foi a que causou a maior redução do sobreaquecimento nas salas do pavimento térreo, enquanto a estratégia de ventilação natural (S2) causou a maior redução nas salas do primeiro pavimento. Como o primeiro pavimento é o mais crítico, a estratégia de ventilação natural é considerada a estratégia mais eficiente, quando atuando de forma isolada na edificação.

A estratégia de cobertura verde (S3) também provocou uma redução nas temperaturas internas das salas de aula, porém teve a pior performance entre as três estratégias. O resultado não é satisfatório pois, além de ter a pior performance, a cobertura verde também exige o maior custo de implantação quando é comparada com as outras estratégias estudadas.

Sobre as combinações de duas estratégias, estas tiveram uma eficiência mais significativa. Como esperado, a combinação da estratégia de ventilação natural com a de pintura refletante (S6) foi a que apresentou a maior eficácia na redução do desconforto térmico por sobreaquecimento na maioria das salas de aula.

A combinação da estratégia de ventilação natural com a de cobertura verde (S5) foi a segunda mais eficiente, por reduzir mais o sobreaquecimento nas salas do primeiro pavimento, enquanto a combinação da estratégia de cobertura verde combinada com a de pintura refletante (S7) causou uma redução mais acentuada nas salas do pavimento térreo, sendo a combinação de duas estratégias menos eficiente.

As combinações das três estratégias (S8.1 e S8.2) tiveram os melhores resultados. Entre elas, a simulação mais eficiente foi a S8.2, que se diferenciava da simulação S8.1 apenas por contar com o sistema de proteção solar habilitado.

Outro resultado interessante a ser discutido é a análise horária da temperatura interna para um dia quente de verão na Sala de Aula 3PP (sala mais quente). Desta maneira, a Figura 4-47 apresenta a variação horária da temperatura interna ao longo do dia para as simulações do edifício existente (S0.1, S0.2, S0.3 e S0.4) e a Figura 4-48 apresenta a variação horária para: a) as simulações das estratégias de arrefecimento passivo (S1, S2, S3 e S4) e b) as simulações das combinações das estratégias (S5, S6, S7, S8.1 e S8.2).

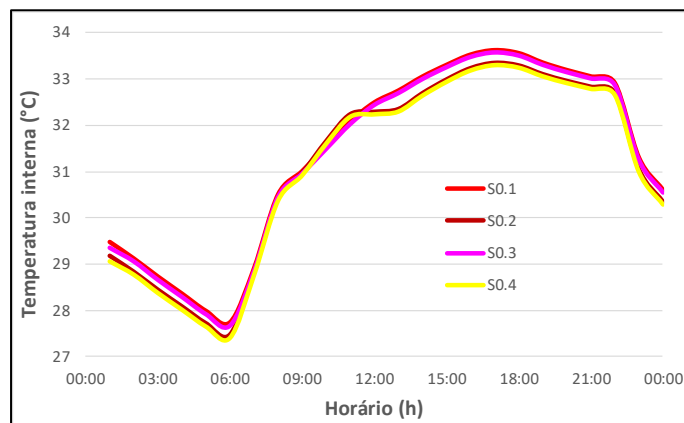


Figura 4-47: Variação horária da temperatura do ar interna na Sala de Aula 3PP para as simulações do edifício existente

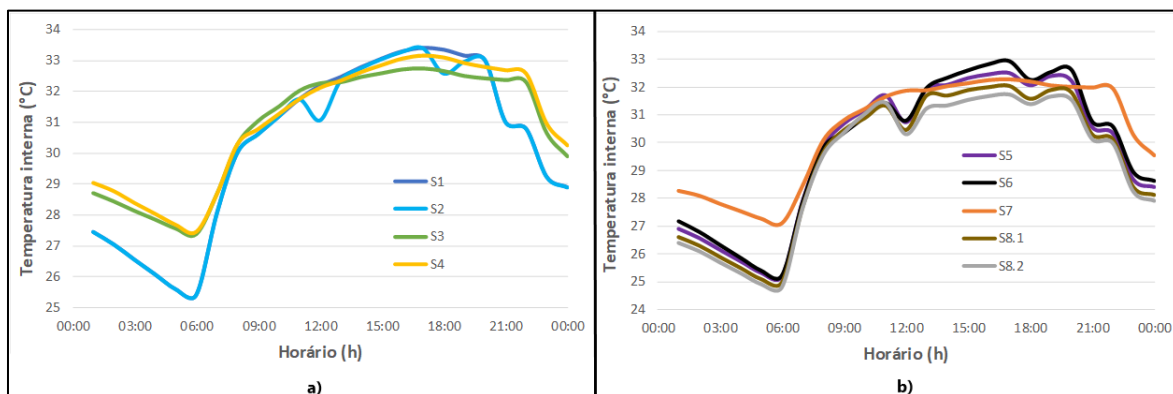


Figura 4-48: Variação horária da temperatura do ar interna na Sala de Aula 3PP para as simulações do edifício a) com as estratégias de arrefecimento e b) com as combinações de estratégias

Para complementar a análise, a Figura 4-49 apresenta: a) a diferença entre a variação horária da temperatura interna da simulação S0.1 e a variação horária das simulações com as estratégias de arrefecimento passivo (S1, S2, S3 e S4), e b) a diferença entre a variação horária da temperatura interna da simulação S0.1 e a variação horária das simulações com as combinações de estratégias (S5, S6, S7, S8.1 e S8.2). Considerando os resultados do mesmo dia quente de verão.

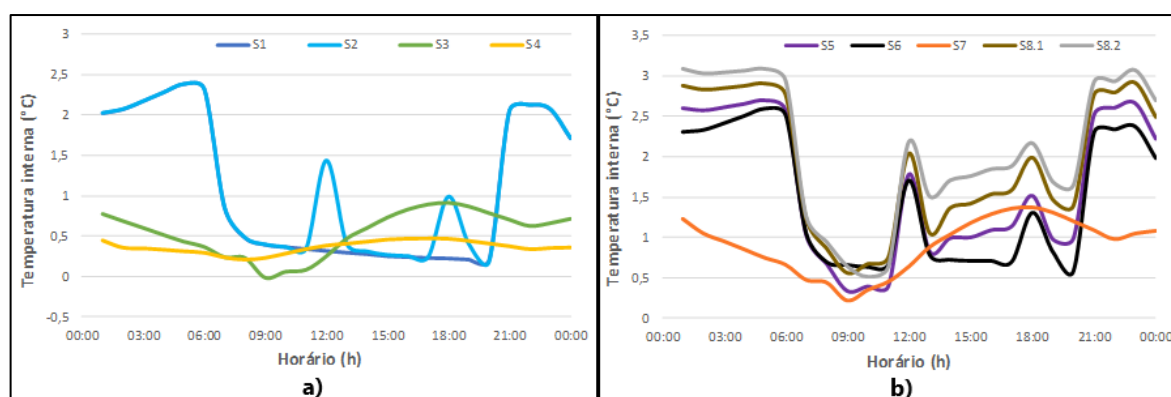


Figura 4-49: Diferença da temperatura do ar interna entre a simulação S0.1 e as simulações a) das estratégias de arrefecimento e b) das combinações entre as estratégias

Analisando os gráficos presentes na Figura 4-49 pode-se perceber que para o dia quente de verão as estratégias de arrefecimento passivo conseguem uma redução máxima de um pouco mais de 3 °C.

5. Conclusões

5.1 Conclusões gerais

Este trabalho pretendia avaliar as condições de conforto térmico no interior das salas de aula de um edifício universitário, nomeadamente ao nível do desconforto por sobreaquecimento, e testar a eficácia de diferentes estratégias de arrefecimento passivo com o objetivo de melhorar o desempenho térmico das salas de aula.

A elaboração desta dissertação incidiu essencialmente na realização de simulações do estado atual do bloco M da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco, no Brasil, para analisar o conforto térmico sentido pelos estudantes que ocupam a edificação. Estas simulações mostraram períodos significativos de desconforto por sobreaquecimento, que foi procurado minimizar através de simulações utilizando estratégias passivas de arrefecimento.

As conclusões da presente dissertação foram divididas em duas categorias, as conclusões acerca do desempenho atual do edifício e as conclusões relacionadas com a eficiência das estratégias de arrefecimento estudadas. A respeito do desempenho atual do edifício:

- O edifício no seu estado atual não apresenta condições de conforto adequadas, demonstrando sérios problemas de sobreaquecimento durante largos momentos do seu período de ocupação;
- As simulações do edifício existente, S0.1, S0.2, S0.3 e S0.4, tiveram um papel fundamental para caracterizar o nível de desconforto térmico em que o edifício se encontra atualmente. O caso mais crítico foi o da simulação S0.1, cenário em que a infiltração de ar era contínua de $0,5 \text{ h}^{-1}$, a menor taxa de infiltração considerada no estudo, e que não contava com o sistema de proteção solar.

As conclusões relacionadas com a eficiência das estratégias de arrefecimento passivo são as seguintes:

- As estratégias de arrefecimento passivo que foram analisadas não têm um impacto muito significativo se forem implementadas isoladas, porém algumas combinações das mesmas podem resultar numa melhoria relevante das condições de conforto térmico no período mais quente
- Sobre as estratégias de arrefecimento passivo atuando isoladamente no edifício, a estratégia de pintura refletiva (S4) causou a maior redução do sobreaquecimento nas salas do pavimento térreo, enquanto a estratégia de ventilação natural (S2) causou a maior redução nas salas do primeiro pavimento. Como o primeiro pavimento é o mais crítico da edificação, a estratégia de ventilação natural é considerada a estratégia mais eficiente. A estratégia de cobertura verde (S3) também provocou uma redução nas temperaturas internas das salas de aula, porém teve a pior performance entre as três estratégias;
- Todas as combinações de duas estratégias tiveram uma eficiência mais significativa do que quando elas estão atuando isoladamente, demonstrando que a utilização das estratégias em conjunto pode ser uma boa maneira de combater o sobreaquecimento nas salas de aula.
- As combinações das três estratégias apresentaram um impacto ainda mais significativo na melhoria do conforto térmico. A simulação S8.2, que além da combinação das três estratégias contava com o sistema de proteção solar, teve grande destaque e foi o cenário mais eficiente. Este cenário quase extinguiu o desconforto térmico por sobreaquecimento no pavimento térreo, e reduziu drasticamente o desconforto térmico no primeiro pavimento, diminuindo até 20,39% das horas ocupadas em desconforto por sobreaquecimento e até 1286,39 graus-horas na sala de aula 1PP.

Outra conclusão importante que pode ser extraída a partir do estudo é a respeito da diferença entre as temperaturas do pavimento térreo e do primeiro pavimento. Em que o primeiro pavimento é mais quente que o pavimento térreo pois tem ganhos significativos pela cobertura, que é mais exposta à incidência de radiação direta. Além disso, o contato com o solo pode ser uma potente forma de arrefecimento das edificações e isso ocorre com o pavimento térreo. A combinação destes dois fatores justifica a grande diferença de temperaturas entre os dois pisos.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Na sequência do presente trabalho seria interessante realizar algumas das seguintes oportunidades para trabalhos futuros:

- Preparar e desenvolver uma plataforma para a recolha, tratamento e disponibilização dos dados climáticos de Pato Branco, para posterior utilização em simulações térmicas e energéticas;
- Realizar uma campanha de medições *in-situ* das condições ambientais interiores das salas de aula. Estas medições não só permitiriam avaliar o conforto térmico das salas de aula, como também possibilitariam a validação e eventual calibração do modelo de simulação;
- Simular o desempenho do edifício utilizando um modelo que também incluísse a transferência de massa. A umidade relativa pode ser um critério condicionante na avaliação do conforto térmico interior em climas quentes e úmidos;
- Realizar uma análise técnico-económica das estratégias de reabilitação que foram simuladas que permita ao decisor fundamentar e hierarquizar as medidas de melhoria a implementar no edifício.

REFERÊNCIAS

1. Taleb, H.M., *Using passive cooling strategies to improve thermal performance and reduce energy consumption of residential buildings in U.A.E. buildings*. *Frontiers of Architectural Research*, 2014. **3**(2): p. 154-165.
2. Kamal, M.A. *An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings: design concepts and architectural interventions*. *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture* Vol. 55, No. 1, Aligarh, 16 de set. de 2012. Disponível em: <<http://constructii.utcluj.ro/ActaCivilEng>>. Acesso em: 20 de nov. de 2019.
3. Santamouris, M. and D. Kolokotsa, *Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art*. *Energy and Buildings*, 2013. **57**: p. 74-94.
4. American Society of Heating, R.a.E.A.-C., *Thermal environmental conditions for human occupancy - ANSI/ASHRAE 55: 2013*. 2013: Atlanta. p. 4.
5. Ruas, Á.C., *Avaliação de Conforto Térmico: Contribuição à aplicação prática das normas internacionais. Dissertação de Mestrado*. 2001, Universidade Estadual de Campinas: Campinas, São Paulo, Brasil.
6. ISO, *Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities ISO 7726: 1998*. 1998, EN ISO: Geneve: Geneve.
7. ISO, *Ergonomics of the thermal environment analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria ISO 7730: 2005*. 2005, EN ISO: Geneve: Geneva.
8. Baker, N. and M. Standeven, *Thermal comfort for free-running buildings*. *Energy and Buildings*, 1996. **23**(3): p. 175-182.
9. Giesta, M.C.A., *Simulação de Técnicas Passivas de Arrefecimento com Recurso ao EnergyPlus. Dissertação de Mestrado*. 2019, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
10. Fanger, P.O., *Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering*. 1970, McGraw-Hill: Denmark.
11. Sorgato, M.J., *Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente. Dissertação de Mestrado*. 2009, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
12. CEN, *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings-addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, EN 15251: 2006*. 2006. Comité Europeu de Normalização.

13. Al-Obaidi, K.M., M. Ismail, and A.M. Abdul Rahman, *Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review*. *Frontiers of Architectural Research*, 2014. **3**(3): p. 283-297.
14. Bozonnet, E., M. Doya, and F. Allard, *Cool roofs impact on building thermal response: A French case study*. *Energy and Buildings*, 2011. **43**(11): p. 3006-3012.
15. Sika Group. Cool roofs reduce urban heat island effect. 2019; Disponível em: <https://www.sika.com/en/knowledge-hub/cool-roofs-reduce-urban-heat-island-effect.html>.
16. Projeteee. Estratégias bioclimáticas. 2019; Disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br/estrategias-bioclimaticas/>.
17. Silva, A.C.S.B.d., *Simulação de Resfriamento Evaporativo por Microaspersão d'Água. Tese de Doutorado*. 2004, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
18. Bom, G.J.F.R.D.E.T.M., *Evaporative air-conditioning*. World Bank Technical Papers. 1999: The World Bank. 87.
19. Nascimento, G.R., *Refrigeração Evaporativa de Telhados por Meio de Gotejamento de Água: Experimento em bancada de testes. Dissertação de Mestrado*. 2005, Universidade Federal de São Carlos: São Carlos, São Paulo, Brasil.
20. Gonzáles, E.C., E. Krüger, and D.E. Giordano, *Estudo da Aplicabilidade de Um Sistema de Resfriamento Evaporativo Indireto para Otimização do Conforto Térmico em Residências no Território Brasileiro*, in *XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*. 2014: Maceió, Alagoas.
21. Lange, S.C., *Avaliação de um Sistema de Resfriamento Passivo para o Clima de Curitiba. Dissertação de Mestrado*. 2016, Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Curitiba, Paraná, Brasil.
22. Castleton, H.F., et al., *Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit*. *Energy and Buildings*, 2010. **42**(10): p. 1582-1591.
23. Rebelo, C.D.A., *Avaliação do Desempenho Higrotérmico de Coberturas Jardim: Análise para diferente zonas climáticas. Dissertação de Mestrado*. 2013, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto: Porto, Portugal.
24. Jaffal, I., S.-E. Ouldboukhitine, and R. Belarbi, *A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance*. *Renewable Energy*, 2012. **43**: p. 157-164.
25. Santamouris, M., et al., *Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece*. *Energy*, 2007. **32**(9): p. 1781-1788.
26. D'Orazio, M., C. Di Perna, and E. Di Giuseppe, *Green roof yearly performance: A case study in a highly insulated building under temperate climate*. *Energy and Buildings*, 2012. **55**: p. 439-451.

27. Parizotto, S. and R. Lamberts, *Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil*. Energy and Buildings, 2011. **43**(7): p. 1712-1722.
28. ASHRAE, *ASHRAE Handbook – Fundamentals*. 2001, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers: USA, Atlanta. cap. 26.
29. Blondeau, P., M. Spérandio, and F. Allard, *Night ventilation for building cooling in summer*. Solar Energy, 1997. **61**(5): p. 327-335.
30. Li, L. and C.M. Mak, *The assessment of the performance of a windcatcher system using computational fluid dynamics*. Building and Environment, 2007. **42**(3): p. 1135-1141.
31. Shaviv, E., A. Yezioro, and I.G. Capeluto, *Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy*. Renewable Energy, 2001. **24**(3): p. 445-452.
32. Kubota, T., D.T.H. Chyee, and S. Ahmad, *The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia*. Energy and Buildings, 2009. **41**(8): p. 829-839.
33. Geros, V., et al., *Experimental evaluation of night ventilation phenomena*. Energy and Buildings, 1999. **29**(2): p. 141-154.
34. Baetens, R., B.P. Jelle, and A. Gustavsen, *Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review*. Energy and Buildings, 2010. **42**(9): p. 1361-1368.
35. Kalnæs, S.E. and B.P. Jelle, *Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities*. Energy and Buildings, 2015. **94**: p. 150-176.
36. Martins, B.F.M., *Materiais de Mudança de Fase (PCM) para Melhoria do Desempenho Térmico de Edifícios. Dissertação de Mestrado*. 2017, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
37. Zhu, N., Z. Ma, and S. Wang, *Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review*. Energy Conversion and Management, 2009. **50**(12): p. 3169-3181.
38. Sayyar, M., et al., *Experimental and numerical study of shape-stable phase-change nanocomposite toward energy-efficient building constructions*. Energy and Buildings, 2014. **75**: p. 249-255.
39. Kuznik, F., J. Virgone, and J.-J. Roux, *Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation*. Energy and Buildings, 2008. **40**(2): p. 148-156.
40. Shi, X., et al., *Experimental assessment of position of macro encapsulated phase change material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels*. Energy and Buildings, 2014. **71**: p. 80-87.

41. Vaz, J., *Estudo Experimental e Numérico Sobre o Uso do Solo Como Reservatório de Energia Para o Aquecimento e Resfriamento de Ambientes Edificados*. Tese de Doutorado. 2011, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
42. Kaushal, M., *Geothermal cooling/heating using ground heat exchanger for various experimental and analytical studies: Comprehensive review*. Energy and Buildings, 2017. **139**: p. 634-652.
43. Mihalakakou, G., M. Santamouris, and D. Asimakopoulos, *Modelling the earth temperature using multiyear measurements*. Energy and Buildings, 1992. **19**(1): p. 1-9.
44. Aranovitch, E., E. De Oliveira Fernandes, and T. Steemers, *Workshop on passive cooling*. 1990.
45. Givoni, B., *Cooled soil as a cooling source for buildings*. Solar Energy, 2007. **81**(3): p. 316-328.
46. Mihalakakou, G., *On the use of sunspace for space heating/cooling in Europe*. Renewable Energy, 2002. **26**(3): p. 415-429.
47. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Simulação Termo-Energética de Edificações. 2020; Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/linhas-de-pesquisa/simulacao-termo-energetica-de-edificacoes>.
48. EnergyPlus™. Guetting Started with EnergyPlus. In *EnergyPlus Documentation*, 1-6, 2013.
49. Alves, A.P.d.A.M., *Simulação Térmica Multizona de um Edifício Escolar: uma comparação de programas no âmbito do RSECE*. 2011, Universidade do Minho: Braga, Portugal.
50. Pereira, P.D.S., *Reabilitação da Cantina da FEUP para Melhoria do Conforto Higrotérmico*. 2015, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
51. Município de Pato Branco. Informações Gerais. 2020; Disponível em: <http://patobranco.pr.gov.br/omunicipio/informacoes-gerais/>.
52. Governo do Estado do Paraná. Agência de notícias do Paraná. 2020; Disponível em: <http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=102949>.
53. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Notícias - Campus Pato Branco. 2020; Disponível em: <http://www.utfpr.edu.br/noticias/pato-branco/inauguracoes/destaque-1.jpg/view>.
54. Tabalipa, N. L., A. P. Fiori, *Estudo do Clima do Município de Pato Branco, Paraná*. Sinergismis scyentifica UTFPR, v. 3, n. 4, 2008.
55. Projeteee. Dados Climáticos. 2019; Disponível em: http://projeteee.mma.gov.br/dados-climaticos/?cidade=SC+-+Novo+Horizonte&id_cidade=bra_sc_novo.horizonte.869380_inmet.

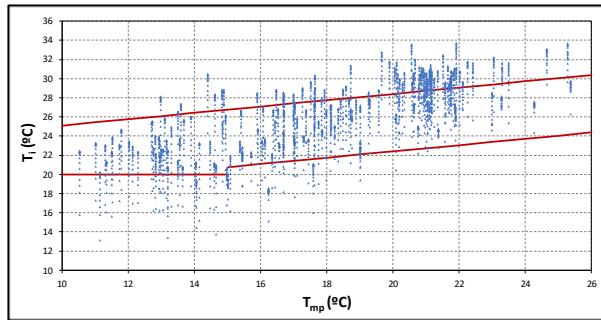
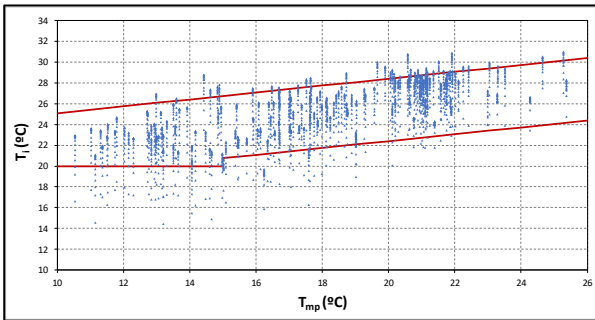
56. Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil – INMET. Banco de Dados Meteorológicos. Brasília – DF, 2016.

57. Sá, C.M.A., *Análise Técnico-económica de Soluções com Materiais de Mudança de Fase*. 2016, Instituto Politécnico de Viseu: Viseu, Portugal.

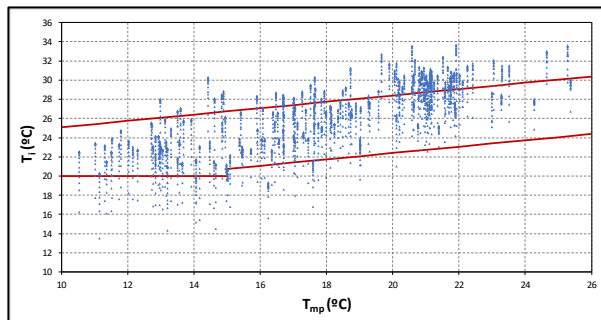
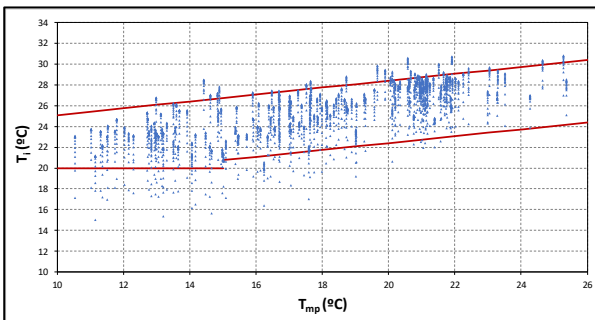
ANEXO 1- AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO SEGUNDO A NORMA EN 15251

1. Simulação S0.2:

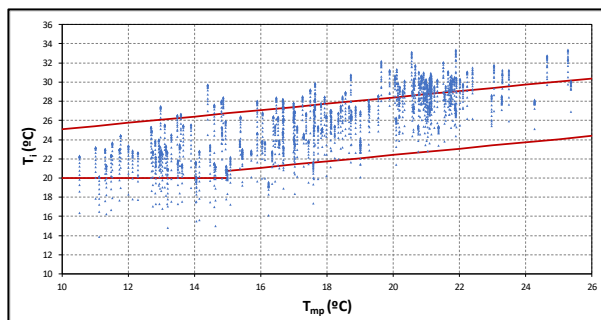
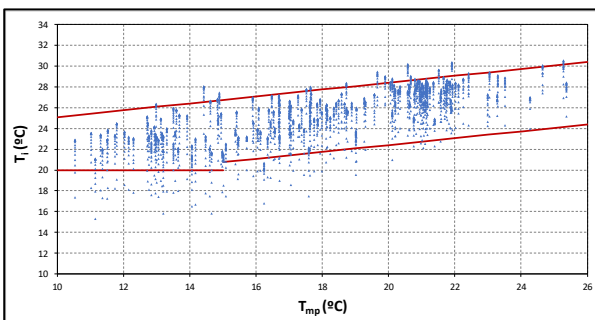
- Sala 1PT e 1PP



- Sala 2PT e 2PP

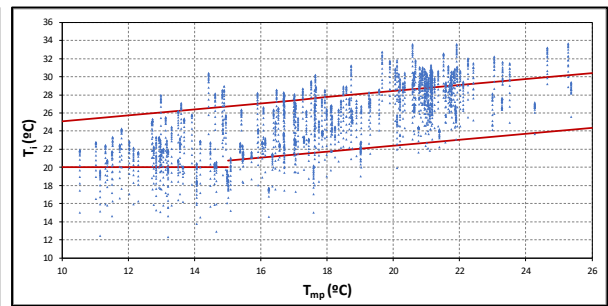
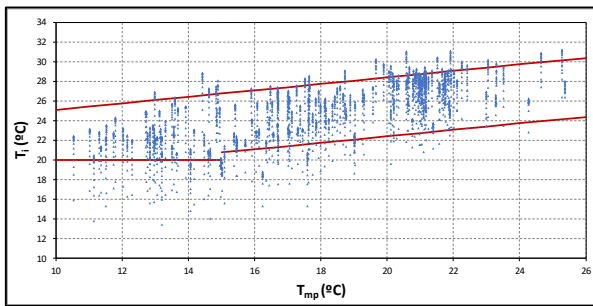


- Sala 3PT e 3PP

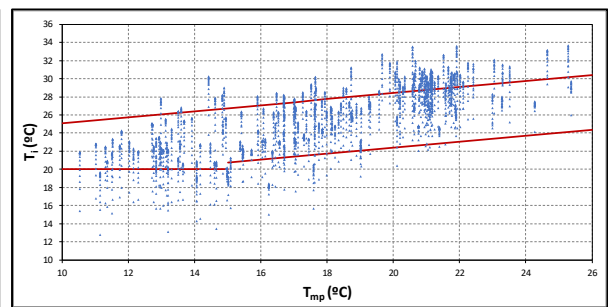
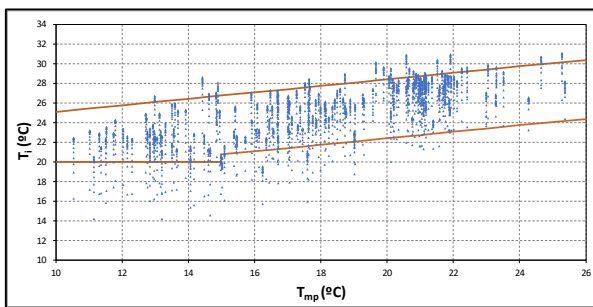


2. Simulação S0.3:

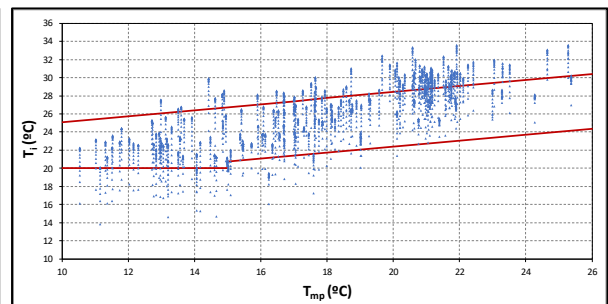
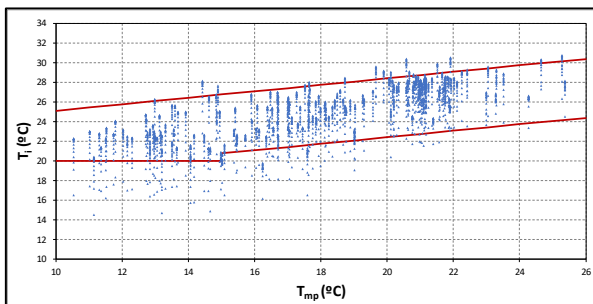
- Sala 1PT e 1PP



- Sala 2PT e 2PP

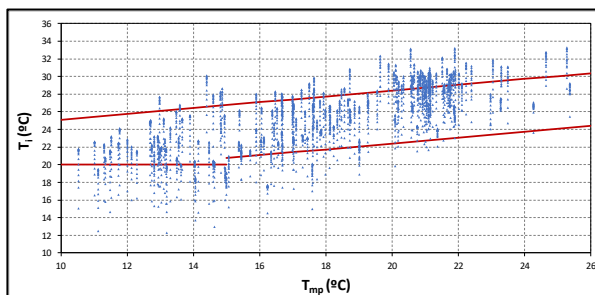
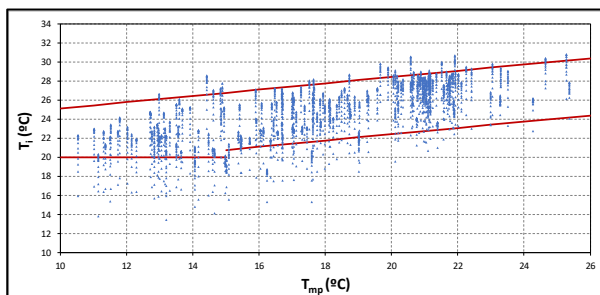


- Sala 3PT e 3PP

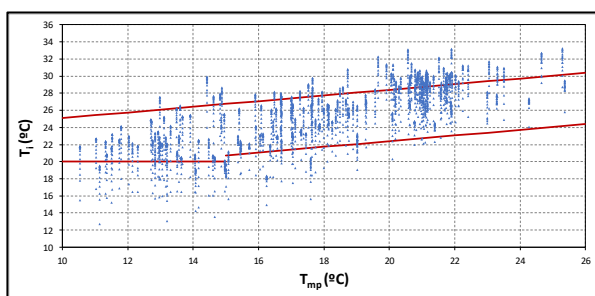
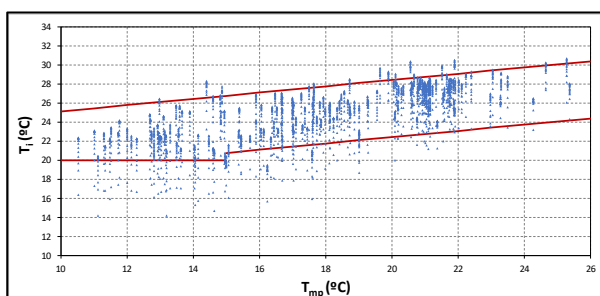


3. Simulação S0.4:

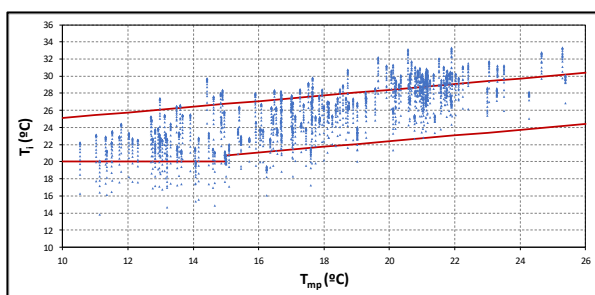
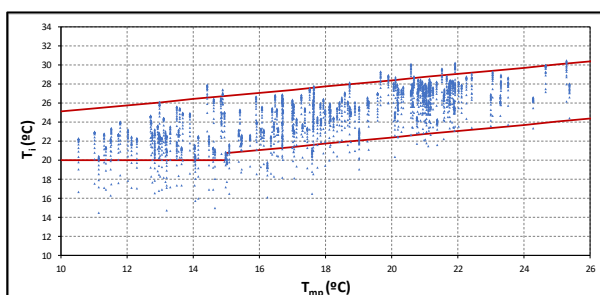
- Sala 1PT e 1PP



- Sala 2PT e 2PP

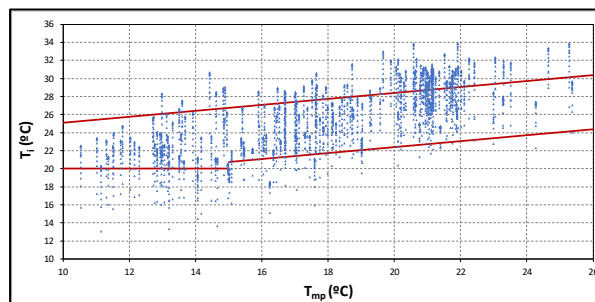
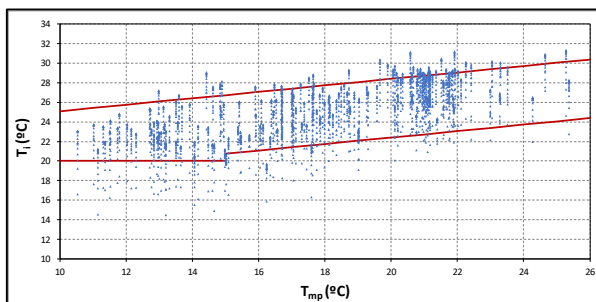


- Sala 3PT e 3PP

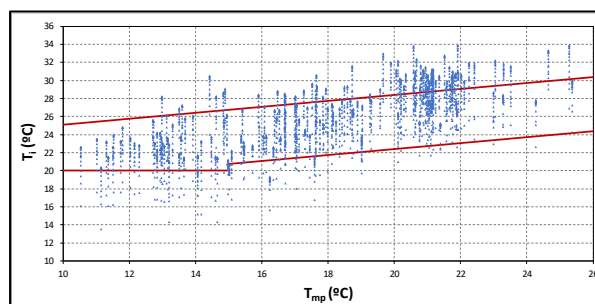
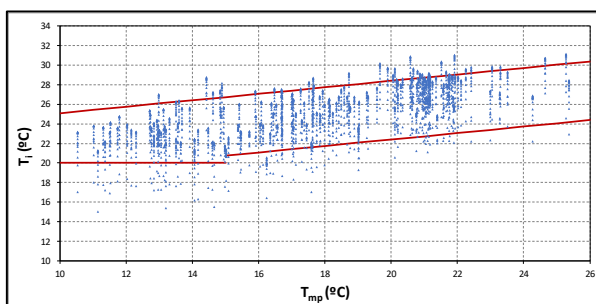


4. Simulação S1:

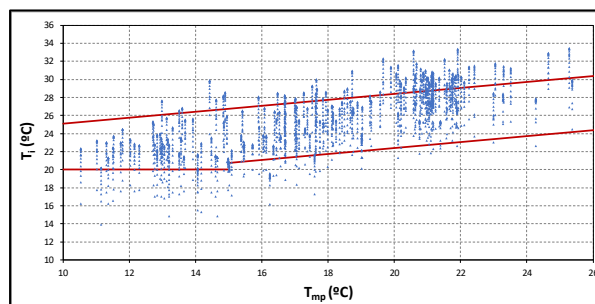
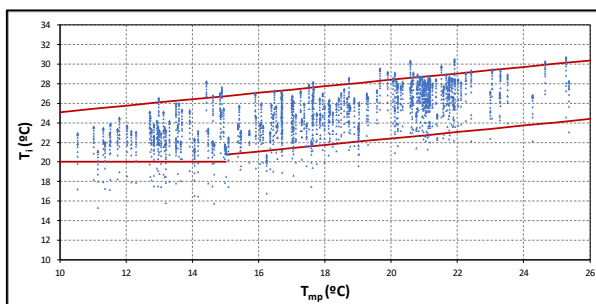
- Sala 1PT e 1PP



- Sala 2PT e 2PP

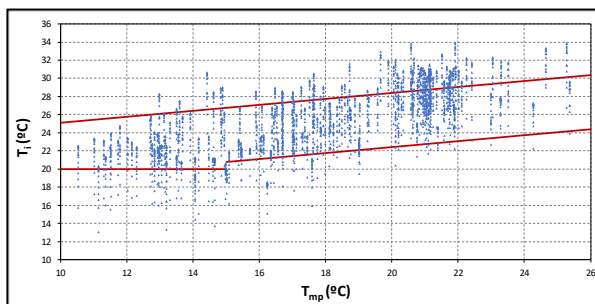
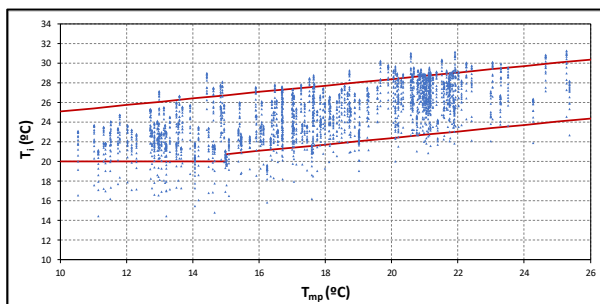


- Sala 3PT e 3PP

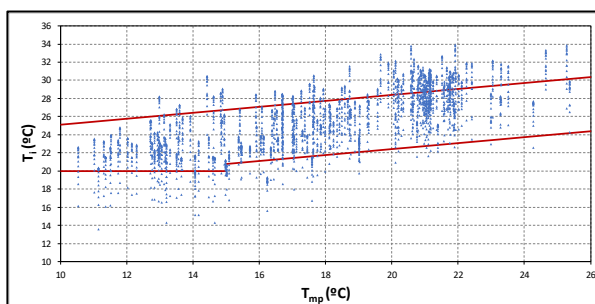
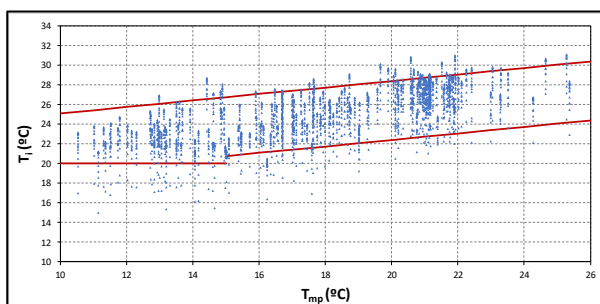


5. Simulação S2:

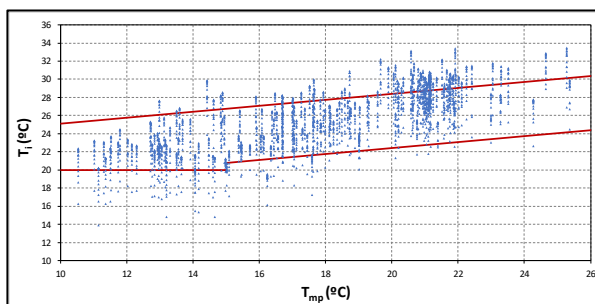
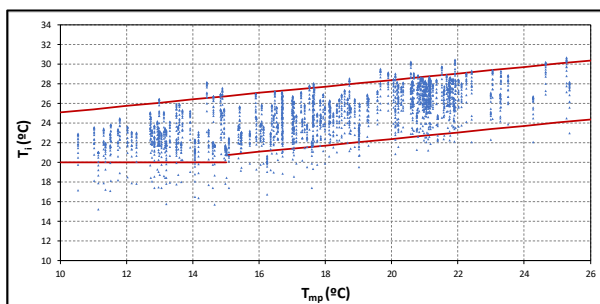
- **Sala 1PT e 1PP**



- **Sala 2PT e 2PP**

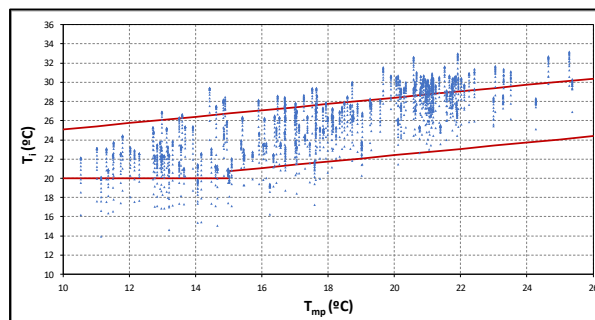
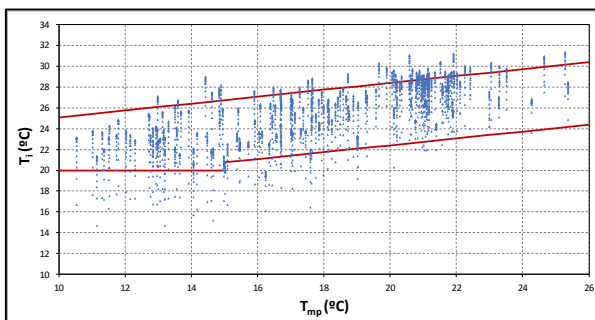


- **Sala 3PT e 3PP**

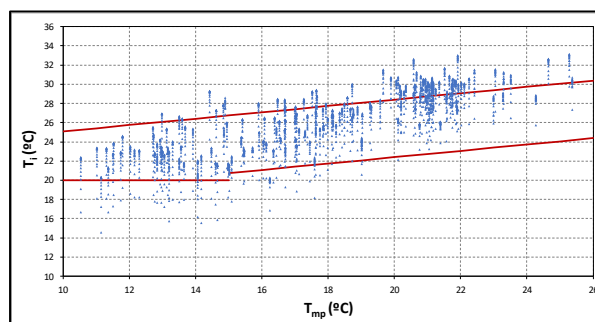
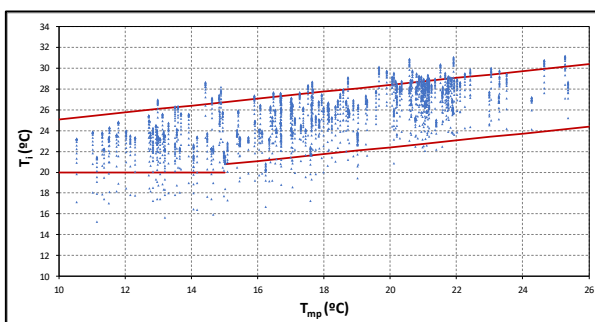


6. Simulação S3:

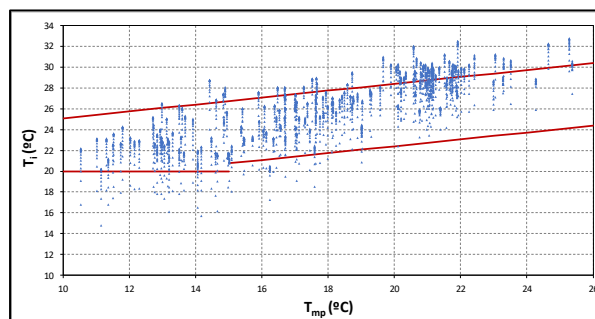
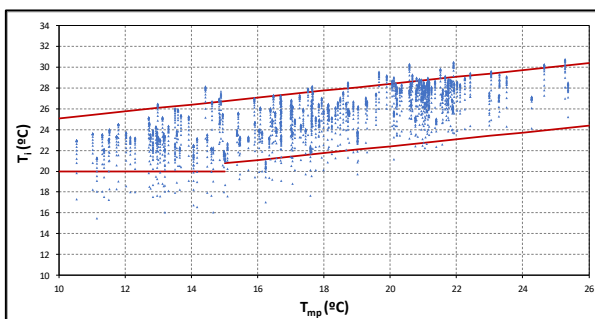
- Sala 1PT e 1PP



- Sala 2PT e 2PP

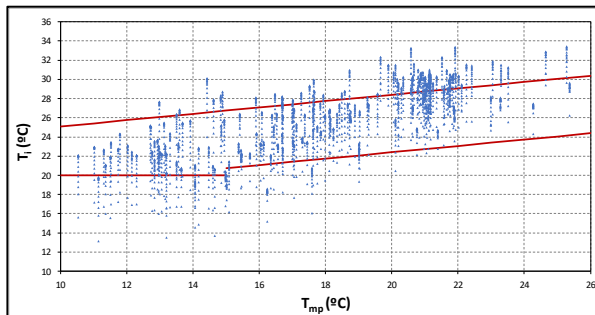
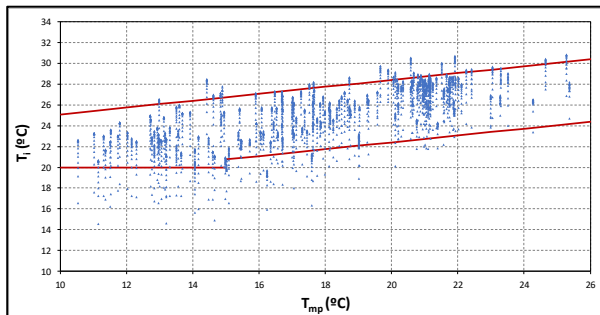


- Sala 3PT e 3PP

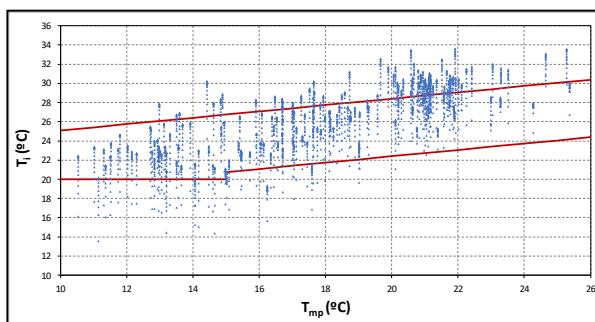
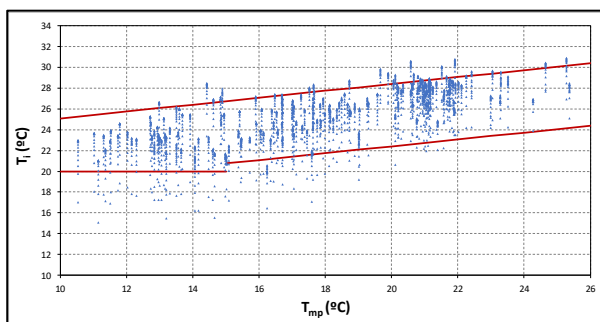


7. Simulação S4:

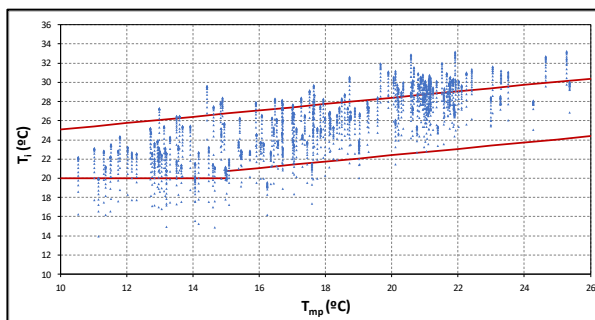
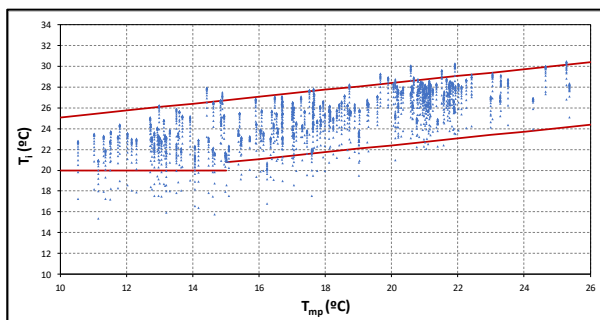
- Sala 1PT e 1PP



- Sala 2PT e 2PP

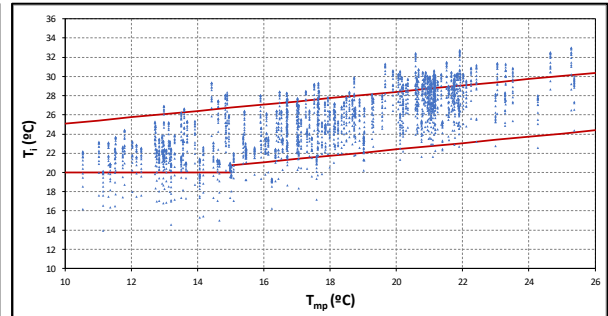
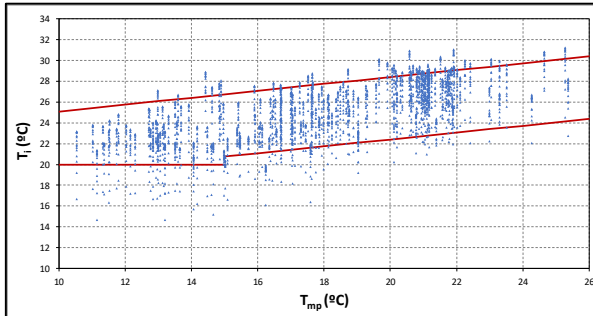


- Sala 3PT e 3PP

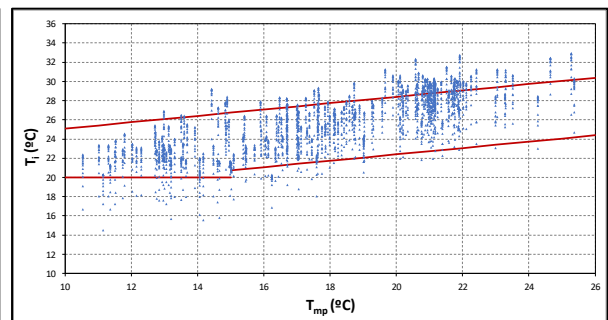
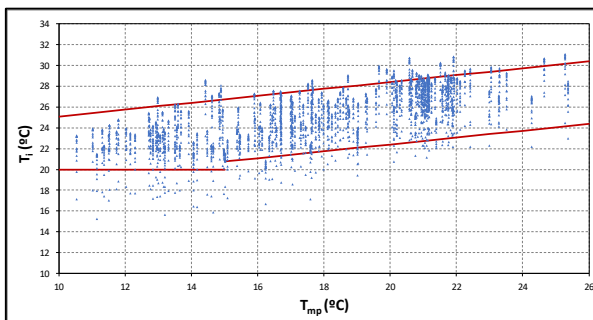


8. Simulação S5:

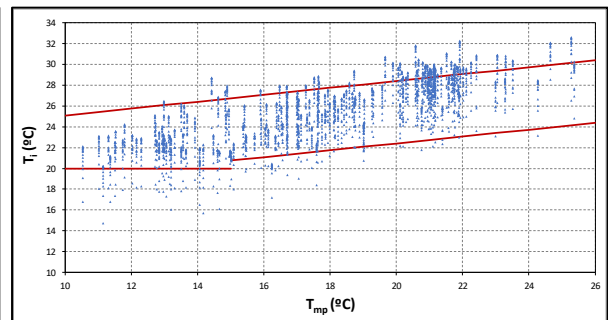
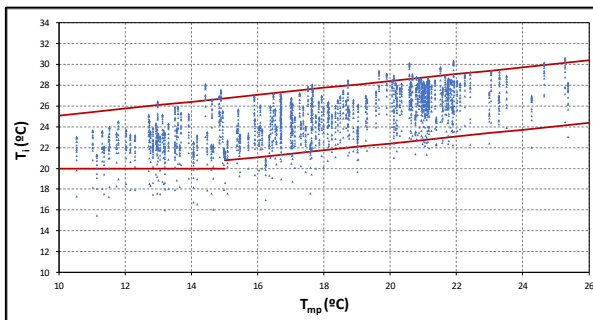
- Sala 1PT e 1PP



- Sala 2PT e 2PP

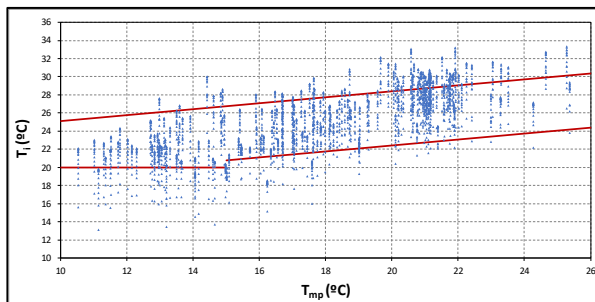
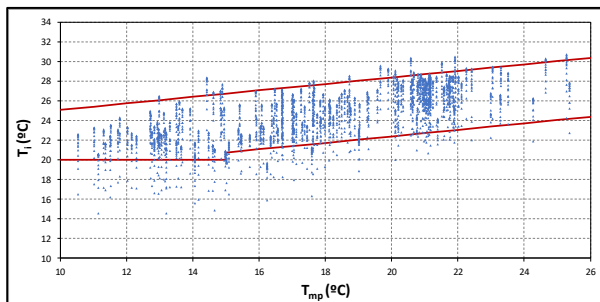


- Sala 3PT e 3PP

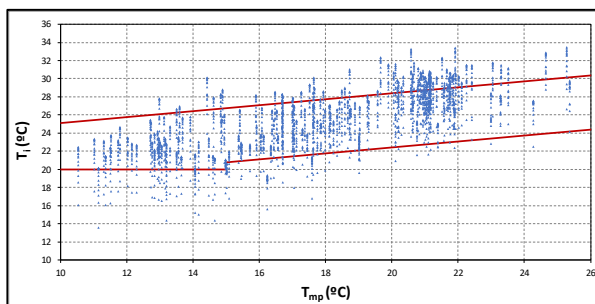
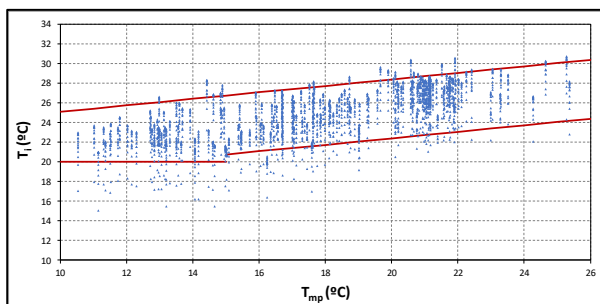


9. Simulação S6:

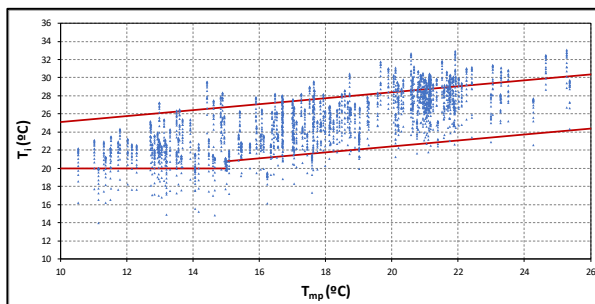
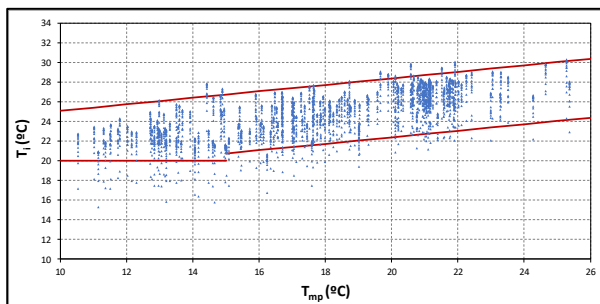
- Sala 1PT e 1PP



- Sala 2PT e 2PP

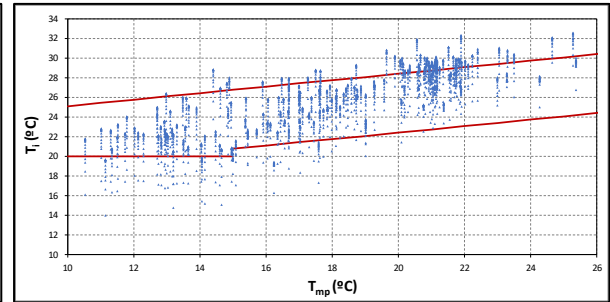
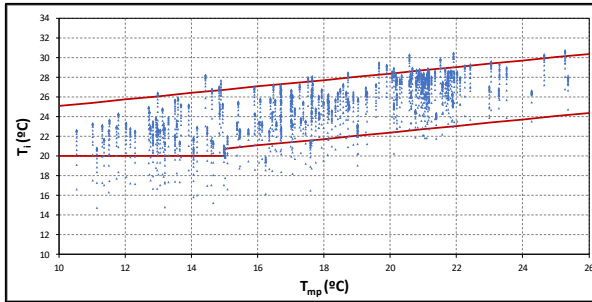


- Sala 3PT e 3PP

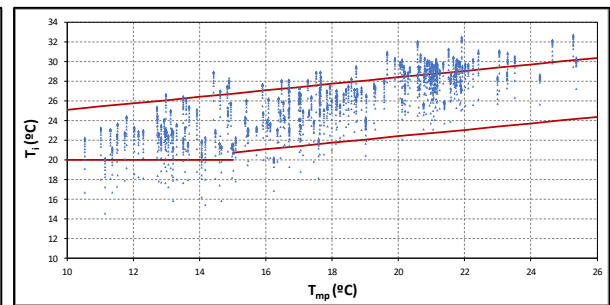
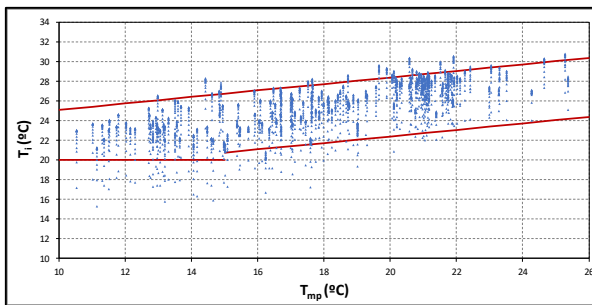


10. Simulação S7:

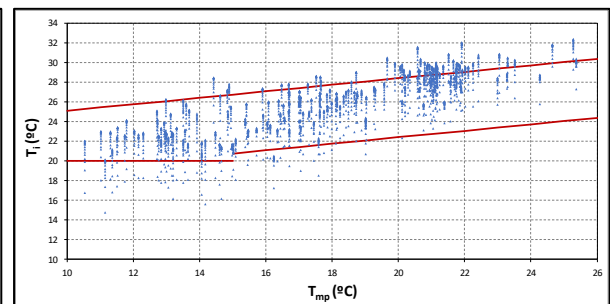
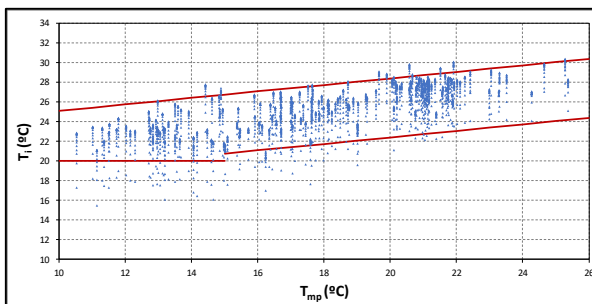
- Sala 1PT e 1PP



- Sala 2PT e 2PP

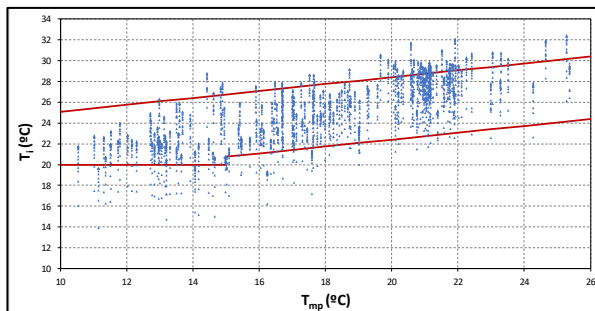
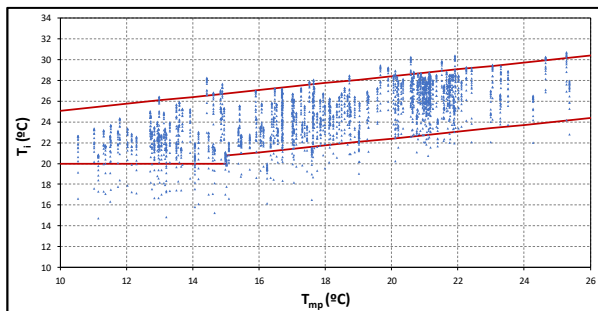


- Sala 3PT e 3PP

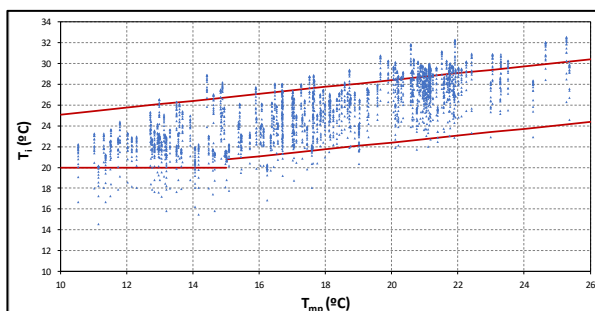
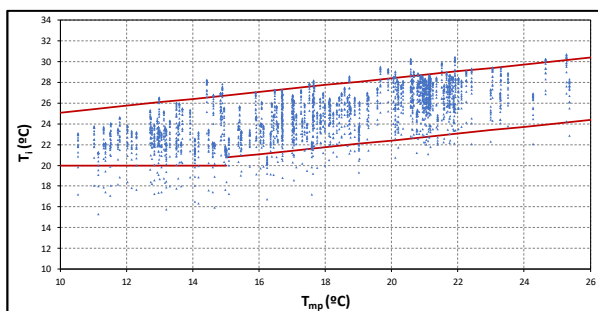


11. Simulação S8.1:

- Sala 1PT e 1PP



- Sala 2PT e 2PP



- Sala 3PT e 3PP

