

TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS NA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM CONDIÇÕES AMBIENTE CONTROLADAS

TIAGO SÁ FERREIRA DE SOUSA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Coorientador: Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira
de Almeida

Coorientador: Professora Doutora Maria de Lurdes de Oliveira Simões

JUNHO DE 2021

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



mipec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Avós e aos meus Pais

Dentro de nós há uma coisa que não tem nome, essa coisa é o que somos.

José Saramago, Ensaio sobre a Cegueira

AGRADECIMENTOS

Chegando a esta fase do meu percurso académico, cumpre lembrar e agradecer todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a sua realização.

Gostaria de agradecer à minha orientadora, a Professora Doutora Eva Barreira, pela sua inesgotável disponibilidade e apoio ao longo do trabalho desenvolvido. O seu rigor científico, bem como conhecimentos profundos da temática abordada, contribuíram, sem dúvida, para a minha formação final nesta instituição. À Professora Doutora Eva Barreira devo também os meus agradecimentos pela proposta do tema, sugestões com vista ao melhoramento desta dissertação e pelo seu acompanhamento em todo este processo.

Gostaria também de agradecer aos meus coorientadores, o Professor Doutor Ricardo Almeida e a Professora Doutora Maria de Lurdes Simões, pela sua partilha de informação e conhecimentos científicos, que foram essenciais para o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço ao Laboratório de Física de Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - LFC-FEUP, pela disponibilização dos equipamentos necessários para a realização dos ensaios, bem como a disponibilidade e amabilidade do seu responsável.

Aos meus familiares, agradeço todo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida. Agradeço os aos meus pais em especial, que me apoiaram e guiaram sempre nos melhores e piores momentos ao longo do meu percurso académico.

Agradeço a todos os meus amigos que me acompanharam durante o meu percurso, por todos os bons momentos passados e as muitas noites de estudo.

Por fim, agradeço a oportunidade de participar no projeto “Protocolo de medição da temperatura corporal através da termografia de infravermelhos – IRT4COVID19”, no âmbito dos Apoios Especiais do Instituto Politécnico de Viseu, despacho nº 59/2020 de 15-09-2020.

RESUMO

O conforto térmico é uma crescente preocupação no âmbito da Engenharia Civil e, como tal, é necessário garanti-lo. Entende-se por conforto térmico uma condição de satisfação do indivíduo face ao ambiente em que se insere. Registam-se diferenças entre indivíduos, que estão associadas a aspetos de ordem fisiológica e psicológica o que torna difícil obter um nível de conforto térmico para diferentes indivíduos num mesmo ambiente.

A termografia de infravermelhos é um método não intrusivo de determinação da temperatura superficial de objetos, pelo que a sua aplicação à temperatura da pele é evidente. Esta utilização foi visível durante a pandemia da Covid-19, na qual foi um método utilizado na deteção de temperaturas corporais extremas. Estudou-se a sua aplicação à avaliação de conforto térmico, com o seu foco no rosto, pelo facto desta não se encontrar coberta com vestuário.

A presente dissertação teve como objetivo principal estudar a utilização da termografia de infravermelhos na determinação da temperatura do rosto com vista a efetuar a avaliação do conforto térmico em condições ambiente controladas.

Com vista a determinar as temperaturas do rosto utilizando a termografia de infravermelhos, efetuaram-se ensaios laboratoriais em condições ambiente controladas, recorrendo à utilização de uma câmara climática. O rosto em estudo foi o do próprio autor desta dissertação. De forma a avaliar a influência dos equipamentos utilizados, realizaram-se ensaios com duas câmaras termográficas diferentes, a Thermo Tracer TH9100 MR da NEC e a TiS60+ da Fluke. Mediu-se ainda a temperatura corporal através de termómetros digitais, com e sem contacto, para uma seleção de humidades relativas.

Realizaram-se ensaios com diferentes combinações de humidade relativa e temperatura, num total de 99 durante a campanha experimental. A humidade relativa variou entre 40% e 80%, com incrementos de 5% e a temperatura variou entre 10°C e 30°C com incrementos de 2°C. Os ensaios decorreram nas instalações do LFC-FEUP entre 22 de março de 2021 e 1 de abril de 2021, durante os quais foram efetuadas 11 combinações por dia.

Efetuuou-se uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos, comparando duas câmaras termográficas, para avaliar a influência de ambos os equipamentos nos valores de temperatura captada. Foi também avaliada a influência das condições ambiente nos valores de temperatura resultantes das imagens térmicas captadas através da termografia de infravermelhos.

O estudo da temperatura do rosto incidiu na divisão da cara em zonas específicas, o nariz, as bochechas, a testa e o queixo, e também a temperatura geral do rosto. Analisaram-se os valores em conjunto com os valores calculados do PMV, estudando uma possível ligação entre os dois parâmetros.

Verificou-se, através da comparação das duas câmaras de infravermelhos, a existência de uma diferença de +0.5°C entre as temperaturas máximas médias obtidas pelas câmaras termográficas NEC e Fluke. Por fim, este estudo constatou que a temperatura geral do rosto é um indicador suficiente na avaliação de conforto térmico, não sendo necessária a avaliação das zonas específicas do rosto.

PALAVRAS-CHAVE: Termografia de infravermelhos, Conforto térmico, Comparação de câmaras de infravermelhos, Temperatura do rosto, PMV.

ABSTRACT

Thermal comfort is a growing concern in the scope of Civil Engineering and, therefore, it must be ensured. Thermal comfort is understood as the individual's satisfaction with the surrounding environmental conditions. The level of satisfaction, which may vary from person to person, is linked both to physiological and psychological characteristics, thus making it difficult to attain a common level of thermal comfort for different individuals in the same environmental conditions.

Infrared thermography is a non-intrusive method of determining the surface temperature of objects, so its application to skin temperature is obvious. This practise was evident during the Covid-19 pandemic as a method to detect extreme body temperatures. It has been assessed the application of infrared thermography to thermal comfort, focusing on the area of the face as it is not covered by clothing.

The current dissertation aims to study the use of infrared thermography to determine facial temperature, in order to assess thermal comfort under controlled environmental conditions.

Laboratory testing was conducted under controlled environmental conditions in a climatic chamber to determine facial temperatures using infrared thermography. The face under study was that of the author of this dissertation. In order to evaluate the influence of the equipment used, tests were conducted with two different thermal imaging cameras, NEC's Thermo Tracer TH9100 MR and Fluke's TiS60+. The individual's body temperature was measured using digital thermometers, with and without contact, for a few selected values of relative humidity.

Several experiments with different combinations of relative humidity and temperature were carried out, in a total of 99 during the preliminary stage. Relative humidity varied between 40% and 80%, with 5% increments, and temperature varied between 10°C and 30°C with 2°C increments. The research took place at the LFC-FEUP facilities between 22nd March 2021 and 1st April 2021, during which 11 combinations were conducted per day.

A qualitative and quantitative analysis of the collected data was carried out to compare both thermographic cameras, to assess the influence of both equipments on the captured temperature values. It was evaluated the influence of environmental conditions on the temperature values resulting from the thermal images captured by infrared thermography.

The study of facial temperature focused on the partition of the face into distinct areas, the nose, the cheeks, the forehead, and the chin, and also the overall temperature of the face. The data was analyzed together with the calculated PMV values, studying a possible link between the two parameters.

Comparing the two infrared cameras, a difference of +0.5°C was detected between the average maximum temperatures obtained by the NEC and Fluke thermographic cameras. Finally, this study verified that the overall temperature of the face is a sufficient indicator in the evaluation of thermal comfort, hence not being required the evaluation of individual areas of the face.

KEYWORDS: Infrared thermography, Thermal comfort, Comparison of infrared cameras, Face temperature, PMV.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	i
Resumo.....	iii
Abstract	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivos do trabalho	1
1.3. Organização e estrutura do texto.....	2
2. ESTADO DE ARTE	3
2.1. Fundamentos da termografia de infravermelhos	3
2.1.1. Radiação Infravermelha	3
2.1.2. Emissividade	4
2.1.3. Diferentes abordagens da termografia de infravermelhos	4
2.2. Aplicações da termografia de infravermelhos.....	5
2.2.1. Diagnóstico de patologias em edifícios	5
2.2.2. Medicina	5
2.2.3. Medição de temperatura corporal em contexto de pandemia.....	5
2.3. Conforto térmico	6
2.3.1. Definição e fatores condicionantes	6
2.3.2. Fatores individuais	6
2.3.3. Fatores ambientais.....	8
2.3.4. Neutralidade térmica	8
2.4. Metodologias tradicionais de avaliação de conforto térmico.....	9
2.4.1. Método gráfico.....	9

2.4.2. Método adaptativo	10
2.4.3. Método analítico	11
2.5 Termografia de infravermelhos na avaliação de conforto térmico	13
2.6 Parâmetros que influenciam a termografia de infravermelhos	14

3. METODOLOGIA..... 15

3.1 Objetivos	15
3.2. Equipamentos utilizados.....	16
3.3. Ensaios preliminares	18
3.3.1. Nota introdutória.....	18
3.3.2. Verificação dos equipamentos.....	19
3.3.3. Preparação do local de ensaio	20
3.4. Procedimentos de ensaio.....	22
3.5. Tratamento dos dados.....	24
3.5.1. Correção e seleção das imagens	24
3.5.2. Comparação das duas câmaras termográficas.....	26
3.5.3. Avaliação do conforto térmico.....	27

4. COMPARAÇÃO DAS DUAS CÂMARAS TERMOGRÁFICAS 31

4.1. Objetivos	31
4.2. Análise qualitativa.....	31
4.3. Análise quantitativa	36
4.3.1. Análise descritiva dos parâmetros ambientais e superficiais.....	36
4.3.2. Análise da localização dos pontos mais quentes	40
4.3.3. Análise das correlações	42

4.3.4. Regressão linear múltipla.....	44
4.3.5. Análise gráfica comparativa dos equipamentos	46
4.3.6. Análise da associação da localização dos pontos mais quentes das câmaras termográficas NEC e Fluke	49

5. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO 51

5.1. Objetivos	51
5.2. Avaliação da temperatura do rosto por áreas	51
5.3. Avaliação do PMV	56

6. CONCLUSÃO..... 59

6.1. Considerações finais	59
6.2. Desenvolvimentos futuros	60

Referências Bibliográficas	61
----------------------------------	----

ANEXO - TERMOGRAMAS CAPTADOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - a) Espectro eletromagnético; b) Espectro da radiação infravermelha utilizado na termografia adaptado de [1]	3
Figura 2 - Análise qualitativa vs análise quantitativa [4]	4
Figura 3 - Zonas de conforto térmico do Verão e Inverno segundo a ASHRAE [12]	9
Figura 4 - Método gráfico da ASHRAE 55 [11]	9
Figura 5 - Relação dos limites de temperatura conforto térmico, T_{conf} , com a temperatura exterior, T_{mp} , para ambientes climatizados (ON) ou não (OFF) [14]	10
Figura 6 - Relação entre o PMV e PPD [15]	12
Figura 7 - Parâmetros que influenciam a termografia de infravermelhos: ambientais, individuais e técnicos [21]	14
Figura 8 - Câmaras termográficas: a) Thermo Tracer TH9100 MR da NEC; b) TiS60+ da Fluke	16
Figura 9 - Câmara climática: a) Hot Box Fitoclima 1000 EDTU com ecrã tátil de controlo; b) Entrada da parte visitável	17
Figura 10 - Equipamentos: a) Sensor de temperatura e humidade relativa; b) Termómetro digital com contacto; c) Termómetro digital sem contacto	18
Figura 11 - Variação da temperatura medida com os termómetros digitais ao longo de um dia (excluindo os valores após a ingestão de bebidas quente e fria)	20
Figura 12 - Estabilização das câmaras termográficas: a) Suporte da câmara Fluke; b) Suporte da câmara NEC; c) Posição das câmaras termográficas nos devidos suportes	21
Figura 13 - Imagens térmicas captadas com a: a) Câmara NEC; b) Câmara Fluke	21
Figura 14 - Esquema com a disposição dos equipamentos no interior da câmara climática	22
Figura 15 - Esquema do ciclo de ensaios	23
Figura 16 - Posição da folha de alumínio na porta	24
Figura 17 - Gráficos de comparação do sensor 475 e 476 durante os cenários de humidade relativa de referência 60% para: a) Temperatura; b) Humidade relativa	25
Figura 18 - Termogramas à folha de alumínio captados com a: a) Câmara NEC; b) Câmara Fluke ...	26
Figura 19 - Imagens térmicas captadas durante os cenários 65% e 14°C, com a localização do ponto mais quente (ponto preto): a) Pela câmara NEC; b) Pela câmara Fluke	26
Figura 20 - Referencial utilizado para a câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke	27
Figura 21 - Formas das caixas para a avaliação do conforto térmico. a) Cara; b) Nariz; c) Bochecha direita; d) Bochecha esquerda; e) Testa; f) Queixo	29
Figura 22 - Imagens térmicas do cenário 10°C - 70% captadas pela câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke	32
Figura 23 - Imagens térmicas do cenário 16°C - 40% captadas pela câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke	32

Figura 24 - Imagens térmicas do cenário 20°C - 80% captadas pela câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke	33
Figura 25 - Imagens térmicas do cenário 24°C - 50% captadas pela câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke	33
Figura 26 - Imagens térmicas do cenário 30°C - 60% captadas pela câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke	34
Figura 27 - Imagens captadas pela câmara termográfica NEC durante os ensaios de humidade relativa de referência 40% para as temperaturas: a) 10°C a 18°C; b) 20°C a 24°C; c) 26°C a 30°C	35
Figura 28 - Imagens captadas pela câmara termográfica Fluke durante os ensaios de humidade relativa de referência 40% para as temperaturas: a) 10°C a 18°C; b) 20°C a 24°C; c) 26°C a 30°C	35
Figura 29 - <i>Boxplot</i> da temperatura medida: a) Refletida, ambiente, refletida da NEC e da Fluke; b) Máxima da NEC e Fluke	37
Figura 30 - <i>Boxplot</i> dos valores da humidade relativa.....	38
Figura 31 - Diferença entre a temperatura ambiente e relativa	38
Figura 32 - <i>Boxplots</i> das temperaturas medidas com os termómetros digitais agrupadas por humidade relativa de referência.....	39
Figura 33 - Comparação das temperaturas máximas obtidas pelas câmaras termográficas com as temperaturas medidas pelos termómetros digitais	40
Figura 34 - Localização dos pontos mais quentes na câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke	41
Figura 35 – Nuvens de pontos	43
Figura 36 - Comparação da temperatura máxima estimada e observada para a câmara termográfica NEC.....	45
Figura 37 - Comparação da temperatura máxima estimada e observada para a câmara termográfica Fluke	46
Figura 38 - Evolução da temperatura medida pelos termómetros digitais e temperatura máxima obtida pelas câmaras termográficas na humidade relativa de referência de: a) 40%; b) 60%; c) 80%.....	48
Figura 39 - <i>Boxplots</i> da temperatura máxima em função da temperatura de referência da câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke.....	48
Figura 40 - <i>Boxplots</i> da temperatura máxima em função da humidade relativa de referência da câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke.....	49
Figura 41 - Associação das localizações dos pontos mais quentes nas câmaras termográficas NEC e Fluke	50
Figura 42 - Evolução da temperatura das zonas do rosto para a humidade relativa de referência de: a) 40%; b) 60%; c) 80%.....	54
Figura 43 - Evolução da temperatura das zonas do rosto para a humidade relativa de referência de 75%	55
Figura 44 - <i>Boxplots</i> das temperaturas das caixas correspondentes à cara (azul), ao nariz (preto) e ao queixo (laranja), agregados por temperatura de referência	55

Figura 45 - Combinação dos valores de PMV e PPD de cada cenário	56
Figura 46 - Relação entre os valores de PMV e temperatura média das caixas	57

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Valores de emissividade de uma seleção de materiais [3]	4
Quadro 2 - Taxas de metabolismo associadas a algumas atividades (Adaptado de [11] [12])	7
Quadro 3 - Exemplos de resistência térmica de peças de vestuário, de acordo com a ASHRAE 55 e a ISO 7730 [11] [15]	7
Quadro 4 - Valores dos parâmetros que permitem a aplicação do método adaptativo [14]	10
Quadro 5 - Escala de conforto térmico (método analítico) [11] [15]	11
Quadro 6 - Categorias de ambiente térmico (Adaptado de [15])	13
Quadro 7 - Características das câmaras termográficas [22].	17
Quadro 8 - Características dos sensores de temperatura e humidade relativa [23].	18
Quadro 9 - Características dos termómetros.....	18
Quadro 10 - Resultados do ensaio preliminar com os termómetros digitais	19
Quadro 11 - Resistência térmica do vestuário segundo a norma ISO 7730 [15].	28
Quadro 12 - Análise estatística descritiva dos parâmetros ambientais e superficiais das imagens captadas pelas câmaras termográficas e outros equipamentos.....	37
Quadro 13 - Resultados dos ensaios realizados com os termómetros digitais com e sem contacto ...	39
Quadro 14 - Matriz de correlação.....	43
Quadro 15 - Modelo de regressão linear a câmara termográfica NEC.....	44
Quadro 16 - Modelo regressão linear para a câmara termográfica Fluke	44

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A_D - Área de superfície de BuBois [m^2]

f_{cl} - Fator da área da superfície do vestuário

h_c - Fator de transferência do calor por convecção [$W/m^2 \cdot K$]

HR - Humidade relativa [%]

HRa - Humidade relativa ambiente [%]

I_{cl} - Isolamento térmico do vestuário [$m^2 \cdot K/W$]

l - Altura [m]

m - Massa [kg]

M - Ritmo metabólico [W/m^2]

p_a - Pressão do vapor de água [Pa]

T_a - Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]

t_a - Temperatura do ar [$^{\circ}C$]

t_{cl} - Temperatura da superfície do vestuário [$^{\circ}C$]

T_{conf} - temperatura interior de conforto [$^{\circ}C$]

T_m - Temperatura máxima obtida através de uma câmara termográfica [$^{\circ}C$]

T_{mF} - Temperatura máxima da câmara termográfica Fluke [$^{\circ}C$]

T_{mN} - Temperatura máxima da câmara termográfica NEC [$^{\circ}C$]

T_{mp} - Temperatura exterior [$^{\circ}C$]

$\bar{t}_r$ - Temperatura média radiante [$^{\circ}C$]

T_{rF} - Temperatura refletida da câmara termográfica Fluke [$^{\circ}C$]

T_{rN} - Temperatura refletida da câmara termográfica NEC [$^{\circ}C$]

v_{ar} - Velocidade do ar [m/s]

W - Trabalho [W/m^2]

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

Covid-19 - Coronavirus disease 2019

FDA - Food and Drug Administration

H1N1 - Influenza A virus subtype H1N1

ISO - International Organization for Standardization

LFC-FEUP - Laboratório de Física de Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

PMV - Predicted Mean Vote

PPD - Predicted Percentage Dissatisfied

SARS-CoV-2 - Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O conforto térmico é uma crescente preocupação no âmbito da Engenharia Civil e, como tal, é necessário garanti-lo. Entende-se por conforto térmico uma condição de satisfação do indivíduo face ao ambiente em que se insere. Registam-se diferenças entre indivíduos, que estão associadas a aspetos de ordem fisiológica e psicológica o que torna difícil obter um nível de conforto térmico para diferentes indivíduos num mesmo ambiente.

A termografia de infravermelhos é um método não intrusivo de determinação da temperatura superficial de objetos. As suas aplicações são diversas, destacando-se a sua utilização no diagnóstico de patologias em edifícios, na medicina e na medição da temperatura da pele. Durante a pandemia da Covid-19 a termografia de infravermelhos foi um dos métodos utilizados na deteção de temperaturas corporais extremas.

A aplicação da termografia de infravermelhos à avaliação de conforto térmico apresenta um grande interesse, uma vez que é possível determinar a temperatura da pele com precisão. O rosto é a zona do corpo normalmente estudada, pelo facto desta não se encontrar coberta com vestuário.

A utilização da termografia de infravermelhos em condições ambiente controladas, permite uma avaliação da influência desses parâmetros na temperatura do rosto, e consequentemente, no conforto térmico.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho é estudar o uso da termografia de infravermelhos para a determinação da temperatura do rosto com vista a efetuar a avaliação do conforto térmico. Nesse sentido foram definidos os seguintes objetivos parciais:

- Revisão dos estudos de conforto térmico com recurso à termografia de infravermelhos;
- Estudo do funcionamento dos equipamentos;
- Realização de ensaios laboratoriais em diferentes condições ambiente controladas (temperatura e humidade relativa), dentro de uma câmara climática;
- Determinação da influência das condições ambiente nos resultados obtidos;
- Determinação da influência dos equipamentos utilizados (câmaras termográficas) nos resultados obtidos;

- Comparação dos valores máximos obtidos através da termografia de infravermelhos com os valores medidos através da utilização de termómetros digitais;
- Análise da temperatura do rosto com a divisão em diferentes zonas específicas;
- Determinação do PMV de acordo com os valores das condições ambiente medidas;
- Estudo da relação entre o PMV e as temperaturas específicas do rosto.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO

A presente dissertação encontra-se subdividida em seis capítulos, distribuídos da seguinte forma:

- No capítulo 1, introduz-se o trabalho desenvolvido, apresentando os objetivos a alcançar ao longo do estudo e a sua estrutura.
- No capítulo 2, descrevem-se os fundamentos da termografia de infravermelhos e as suas aplicações; o conforto térmico e os métodos da sua determinação; os estudos de termografia de infravermelhos na avaliação de conforto térmico.
- No capítulo 3, expõem-se os diversos equipamentos utilizados e as suas características. É também apresentada a metodologia dos ensaios e do tratamento dos dados.
- No capítulo 4, efetua-se a comparação das duas câmaras termográficas com recurso a uma análise qualitativa e quantitativa. Na análise qualitativa é exposta uma seleção dos termogramas captados durante o período experimental. Na análise quantitativa são estudados os pontos mais quentes, através da sua localização e valor de temperatura e os dados obtidos por todos os equipamentos, analisando a sua relação com os valores obtidos pelas duas câmaras termográficas.
- No capítulo 5, apresentam-se os resultados obtidos e a sua análise das temperaturas das zonas específicas do rosto. São também expostos os resultados do cálculo do PMV, efetuando análise conjunta com os valores da temperatura das zonas específicas do rosto.
- No capítulo 6, expõe-se as conclusões finais alcançadas sobre o trabalho efetuado, assim como, possíveis desenvolvimentos futuros relacionados com a temática abordada.

É ainda apresentado um anexo:

- ANEXO - Termogramas captados.

2

ESTADO DE ARTE

2.1. FUNDAMENTOS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

2.1.1. RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

A radiação infravermelha foi descoberta pelo astrônomo William Herschel em 1800. As ondas têm tamanhos compreendidos entre os $0.78 \mu\text{m}$ a 1 mm , correspondendo a uma porção invisível do espectro eletromagnético (Figura 1 a). A porção visível é compreendida entre 0.38 a $0.78 \mu\text{m}$ [1] [2]. No estudo da termografia de infravermelhos, apenas parte do espectro da radiação infravermelha é utilizado (Figura 1 b), podendo ser dividida em três categorias: onda longa (7 a $14 \mu\text{m}$), onda média (3 a $5 \mu\text{m}$) e onda curta (0.9 a $1.7 \mu\text{m}$) [1].

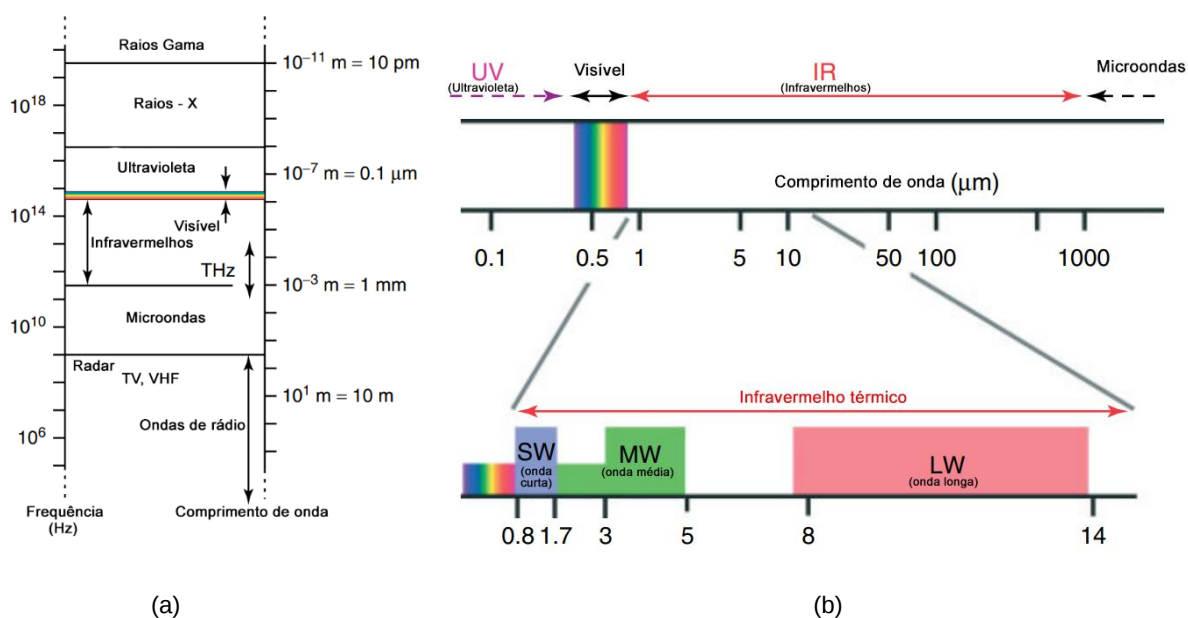


Figura 1 - a) Espectro eletromagnético; b) Espectro da radiação infravermelha utilizado na termografia adaptado de [1]

2.1.2. EMISSIVIDADE

A emissividade é definida como a razão entre a quantidade de radiação emitida por uma superfície e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura. Um corpo negro tem a emissividade de 1, sendo também um refletor perfeito, com um coeficiente de reflexão de 0. A emissividade, ϵ , dos materiais reais está compreendida no intervalo $0 \leq \epsilon \leq 1$.

A emissividade depende de vários parâmetros como: o material, a estrutura da superfície, o ângulo de visualização, a geometria, o comprimento de onda e a temperatura da superfície [1] [2]. Tendo por base diferentes materiais e respectivas emissividades, são apresentados alguns exemplos de valores encontrados na literatura (Quadro 1).

Quadro 1 - Valores de emissividade de uma seleção de materiais [3]

Superfície	Emissividade [ϵ]
Aço galvanizado	0.28
Betão	0.92
Folha de alumínio	0.05
Granito natural	0.96
Pele humana	0.95 - 0.98
PVC	0.91 - 0.93
Tijolo comum	0.81 - 0.86
Vidro	0.92

2.1.3. DIFERENTES ABORDAGENS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

A termografia de infravermelhos é um método não intrusivo, podendo a sua análise ser qualitativa ou quantitativa (Figura 2). A análise qualitativa apenas se foca nos padrões térmicos, i.e., centrando-se apenas na observação das imagens térmicas, sendo possível uma análise no momento do ensaio. A análise quantitativa é mais detalhada, uma vez que é processada toda a informação obtida, sendo, por isso, mais fiável e demorada [4].

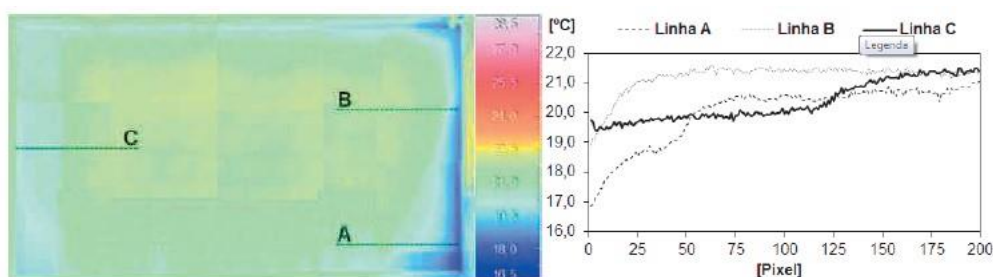


Figura 2 - Análise qualitativa vs análise quantitativa [4]

Os ensaios recorrendo à termografia de infravermelhos podem ser efetuados de duas maneiras diferentes, com ou sem estímulo térmico, ou seja, técnica ativa e técnica passiva, respetivamente. A técnica passiva caracteriza-se pela distribuição natural do calor sobre a superfície de uma estrutura. O seu uso mais comum é em análises qualitativas e na deteção de anomalias. A técnica ativa caracteriza-se pela condução de calor através de fonte térmica artificial. A transmissão de calor é mais eficiente em materiais e estruturas sem defeitos, podendo ser observado gradientes térmicos na imagem térmica [5].

2.2. APLICAÇÕES DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

2.2.1. DIAGNÓSTICO DE PATOLOGIAS EM EDIFÍCIOS

A termografia de infravermelhos, sendo um método não intrusivo, é uma ferramenta que permite o diagnóstico de edifícios e de materiais de construção sem necessidade de ensaios destrutivos. Nestes ensaios é necessário ter em consideração alguns fatores: a necessidade de existir uma diferença de pelo menos 1°C para poder ocorrer deteção da anomalia pelas câmaras termográficas; devido à refletividade dos materiais e incidência solar é sugerido que os ensaios, nalgum tipo de ensaios, que sejam efetuados durante a noite ou num dia nublado de forma a não influenciarem os resultados finais. Em alternativa haverá a possibilidade de se efetuarem os ensaios em paredes interiores [6] [7].

Também é possível determinar o desempenho térmico dos edifícios, através da deteção de perdas de calor pela envolvente, que resultem por exemplo da não existência ou de isolamento térmico danificado, pontes térmicas, fugas de ar e fontes de humidade. Para além disso, permite a inspeção de instalações mecânicas, elétricas e de outros pormenores ocultos [7].

2.2.2. MEDICINA

As aplicações da termografia de infravermelhos no âmbito da medicina incluem o estudo da regulação térmica, a monitorização da pressão sanguínea e a deteção do cancro da mama. Alguns autores também a têm utilizado para o diagnóstico de neuropatia diabética e distúrbios vasculares, de problemas dentários e dermatológicos, de doenças reumáticas, da síndrome de olho seco e doenças oculares. Outras aplicações consistem na sua incorporação como ferramentas de apoio em tratamentos e cirurgias, bem como na realização de testes de personalidade e imagem cerebral [8]. Nos últimos tempos, no contexto de pandemia relacionada com a Covid-19, tem-se intensificando a sua utilização para o rastreio da febre, embora já viesse a ser utilizada noutros contextos.

2.2.3. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA CORPORAL EM CONTEXTO DE PANDEMIA

Tal como referido no subcapítulo 2.2.2, o rastreio de febre é uma das possíveis utilizações da termografia de infravermelhos na medicina. Em contexto de pandemia, este uso pode ser uma ferramenta na deteção da doença infecciosa [9] [10].

Um exemplo desta utilização é a sua implementação durante a pandemia de H1N1-2009 no aeroporto de Narita, Japão, que tinha por objetivo a deteção de temperaturas anómalas. Um estudo dos dados obtidos revelou uma pequena eficácia do método [9].

Atualmente, durante a pandemia de SARS-CoV-2, o uso da termografia de infravermelhos tem sido novamente utilizado. A FDA (Food and Drug Administration) refere as potencialidades e limitações desta tecnologia. O uso recomendado é de avaliação de uma pessoa individualmente em ambientes que diminuam a interferência de fatores que afetam a termografia de infravermelhos, como a temperatura da

divisão, a existência de superfícies de reflexão, a incidência de radiação solar e de forte iluminação artificial [10].

2.3. CONFORTO TÉRMICO

2.3.1. DEFINIÇÃO E FATORES CONDICIONANTES

O conforto térmico é definido como uma condição mental, que manifesta a satisfação de um indivíduo com o ambiente térmico. Existem diferenças entre as diversas pessoas, que se deve às características fisiológicas e psicológicas individuais, originando a uma grande dificuldade em garantir o conforto térmico de diversas pessoas num mesmo ambiente [11].

Segundo a ASHRAE [11], existem seis fatores principais que influenciam o conforto térmico. Estes fatores são agrupados em duas categorias: individuais e ambientais. Os fatores individuais são aqueles que estão ligados às características de cada indivíduo, i.e., o metabolismo e o vestuário. Os fatores ambientais serão os relacionados com o ambiente em que o indivíduo se encontra, a temperatura do ar, a temperatura radiante a velocidade do ar e humidade do ar.

2.3.2. FATORES INDIVIDUAIS

Dependendo da atividade e do ambiente em que o indivíduo se encontra, o metabolismo tem um comportamento diferente [12]. Para avaliar este parâmetro, é utilizada a taxa de metabolismo. Pode ser traduzida em W/m^2 ou então em met (1), correspondendo 1met a uma pessoa sedentária [12]. Valores típicos da taxa de metabolismo estão representados a seguir no Quadro 2, os quais se referem a um adulto comum com área corporal de $1.8 m^2$. Este valor de $1.8 m^2$ utilizado pela ASHRAE [12] é também referido pela ISSO 8896 [13], que, contudo, faz uma diferenciação entre homens e mulheres, sendo as áreas consideradas de $1.8 m^2$ e $1.6 m^2$ respetivamente [13]. A equação (2) permite calcular a área da superfície de um corpo humano, proposta por DuBois e DuBois [12].

$$1met = 58.1W / m^2 \quad (1)$$

$$A_D = 0.202 \cdot m^{0.425} \cdot l^{0.725} \quad (2)$$

Em que,

A_D - Área de superfície de BuBois [m^2];

m - Massa [kg];

l - Altura [m].

Quadro 2 - Taxas de metabolismo associadas a algumas atividades (Adaptado de [11] [12])

Atividade		Taxa de metabolismo	
		[met]	[W/m²]
Repouso	Dormir	0.7	40
	Deitar	0.8	45
	Sentado	1.0	60
	Em pé	1.2	70
Caminhar	3.2 km/h	2.0	115
	4.3 km/h	2.6	150
	6.8 km/h	3.8	220
Atividades de escritório	Leitura	1.0	55
	Escrita	1.0	60
Outras atividades	Cozinhar	1.6-2.0	96-115
	Limpeza da casa	2.0-3.4	115-200
	Dança	2.4-4.4	140-255
	Exercício	3.0-4.0	175-235

O vestuário é um fator importante no conforto térmico, existindo uma distinção entre a estação de arrefecimento (Verão) e a estação de aquecimento (Inverno), na definição da zona de neutralidade térmica da ASHRAE [12]. A forma de avaliação deste parâmetro faz-se através da resistência térmica das peças de vestuário, em clo [11]. Alguns destes valores diferem em diferentes fontes, algo que resulta de estes serem valores médios e da existência de uma grande variedade de tipos de tecidos na composição do vestuário [14]. O Quadro 3 apresenta alguns exemplos de resistência térmica de peças de vestuário tipo, de acordo com a ASHRAE 55 e a ISO 7730 [11] [15].

Quadro 3 - Exemplos de resistência térmica de peças de vestuário, de acordo com a ASHRAE 55 e a ISO 7730 [11] [15]

	ASHRAE 55 [clo]	ISO 7730 [clo]
Roupa interior	0.15	0.10
Camisa de manga curta	0.17	0.15
Calças normais	0.24	0.25
Meias	0.02	0.02
Botas	0.10	0.10
Camisola fina	0.25	0.20
Casaco impermeável	-	0.30

2.3.3. FATORES AMBIENTAIS

A temperatura do ar é o fator ambiental mais relevante na avaliação de conforto térmico devido à acessibilidade de especificação das condições ambientais. Deve ser considerada nas trocas de calor por convecção entre o corpo humano e o ambiente envolvente [14].

A temperatura média radiante define-se como sendo uma temperatura uniforme de um meio imaginário no qual as transferências de calor entre o corpo humano são iguais às da radiação num meio real. A sua determinação é complexa devido a ser necessário conhecer os valores da temperatura, da emissividade e de todas as áreas das superfícies do local em estudo [12].

A velocidade do ar é definida como o ritmo do movimento do ar num ponto, sem ter em consideração a sua direção [11]. A velocidade do ar influencia as trocas de calor por convecção entre a pessoa e o ambiente. Não existe um valor mínimo da velocidade do ar para uma sensação de conforto térmico. Contudo, em temperaturas ambiente elevadas, um maior valor de velocidade do ar permite diminuir a sensação de calor. Na estação de arrefecimento (Verão) a velocidade do ar é superior devido à abertura de janelas e utilização de ventoinhas, que permite uma diminuição da sensação de calor. No entanto, a diferença de temperatura entre a pele/roupa e o ar são fatores importantes na sensação de conforto térmico [15].

A humidade do ar pode ser referida como humidade relativa, relação expressa em percentagem entre a quantidade de vapor de água no ar e a que existiria se o ar se encontrasse saturado, ou humidade absoluta, quantidade de vapor de água no ar [16]. A influência da humidade no conforto térmico de um indivíduo difere consoante a temperatura e níveis de atividade. Para temperaturas ($< 26^{\circ}\text{C}$) e níveis de atividade (< 2 met) moderados, a influência é reduzida, aumentando com o incremento da temperatura e do nível de atividade [15].

2.3.4. NEUTRALIDADE TÉRMICA

A neutralidade térmica é definida como o intervalo de temperaturas no qual a produção de calor, pelo corpo humano através do metabolismo, se mantém constante. As trocas com o ambiente são equilibradas, não existindo a necessidade de gerar ou dissipar calor, mantendo a temperatura corporal constante [17].

A adaptação do vestuário às condições ambiente faz com que a norma ASHRAE apresente duas estações diferentes, a estação de arrefecimento (Verão) e a estação de aquecimento (Inverno), apresentadas na Figura 3. Este gráfico pressupõe a referida mudança de roupa e de uma atividade maioritariamente sedentária. A zona central do gráfico corresponde a uma sensação de neutralidade térmica do indivíduo. Nas zonas do gráfico mais próximas das condições fronteira, a sensação térmica pode variar ± 0.5 na escala de sensação térmica da ASHRAE [12].

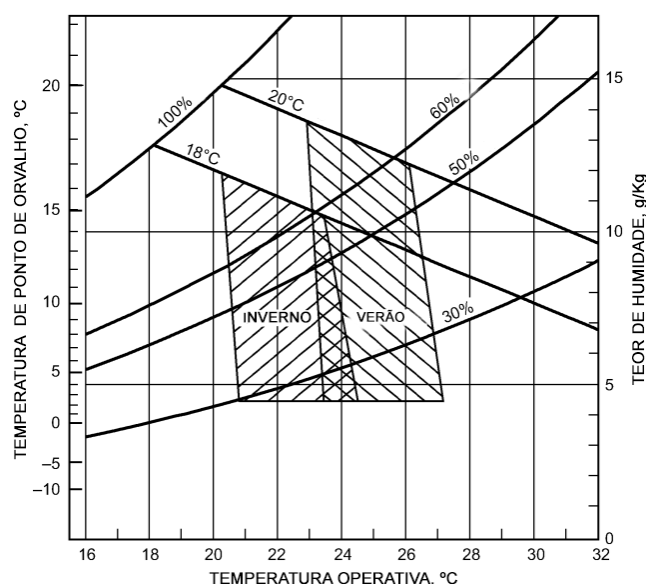


Figura 3 - Zonas de conforto térmico do Verão e Inverno segundo a ASHRAE [12]

2.4. METODOLOGIAS TRADICIONAIS DE AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO

2.4.1. MÉTODO GRÁFICO

O método gráfico incluído no ASHRAE 55 permite a determinação do conforto térmico através da Figura 4. Esta metodologia apresenta duas zonas de conforto térmico, associadas à resistência térmica do vestuário, uma com o valor de 0.5 clo e outra com o valor de 1.0 clo. Estes valores estão associados ao vestuário utilizado em ambientes quentes (0.5 clo) e ambientes frios (1.0 clo). O nível do ritmo metabólico, que é aplicado neste método, encontra-se compreendido entre o intervalo de 1.0 a 1.3 met. A velocidade do ar está limitada ao valor de 0.2 m/s, uma vez que velocidades elevadas levam a um aumento da temperatura operativa [11].

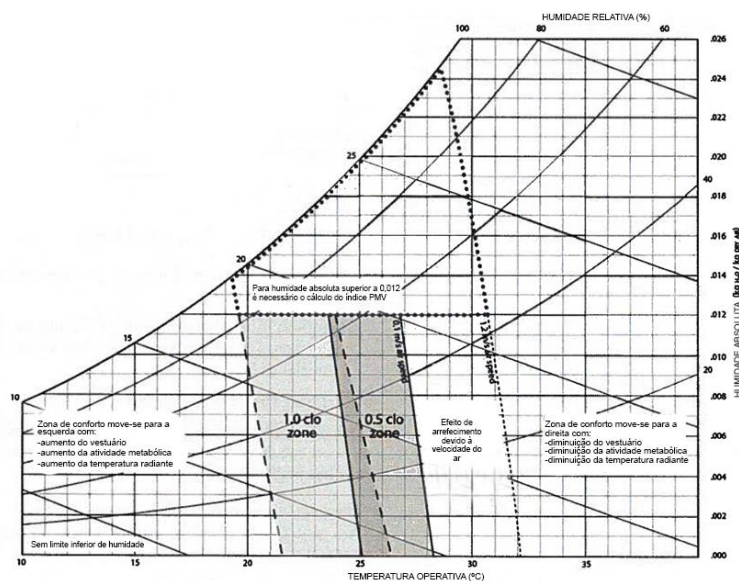


Figura 4 - Método gráfico da ASHRAE 55 [11].

2.4.2. MÉTODO ADAPTATIVO

O método adaptativo desenvolvido por Matias, L. [14] é válido para as condições apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Valores dos parâmetros que permitem a aplicação do método adaptativo [14]

Parâmetros	Gama de valores
Taxa de metabolismo (met)	1.0 a 1.3
Resistência térmica do vestuário (clo)	0.4 a 1.4
Velocidade do ar (m/s)	0 a 0.6
Temperatura operativa interior (°C)	10 a 35
Temperatura exterior exponencialmente ponderada(°C)	5 a 30

Neste método, foi adotada a temperatura interior de conforto, T_{conf} , ao invés da temperatura de neutralidade. A T_{conf} é correspondente à temperatura operativa, num dado ambiente com um índice térmico associado superior a 2.5. O conforto térmico neste método encontra-se relacionado com as condições exteriores, ou seja, temperatura exterior, T_{mp} . Esta relação deve-se ao facto de existir uma forte dependência entre a T_{conf} e a T_{mp} , em ambientes climatizados e não climatizados. Na Figura 5 são apresentadas as retas associadas a ambientes climatizados e não climatizados, apresentando declives distintos. São também expostos os limites associados às gamas de conforto, para ambientes climatizados e não climatizados, tendo uma variação de $\pm 3^\circ\text{C}$ em relação à temperatura reta correspondente [14].

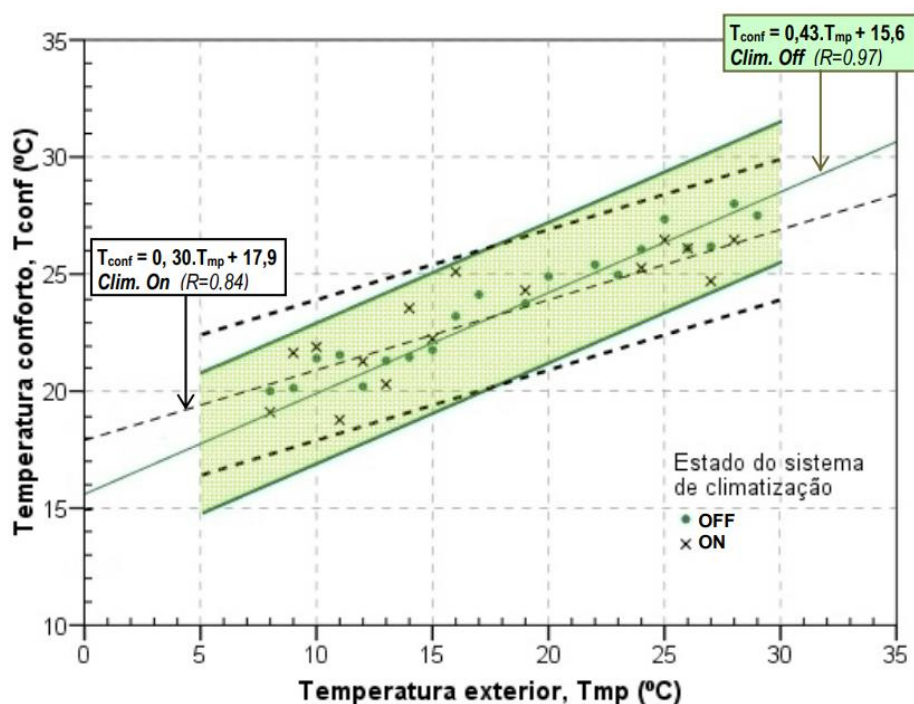


Figura 5 - Relação dos limites de temperatura conforto térmico, T_{conf} , com a temperatura exterior, T_{mp} , para ambientes climatizados (ON) ou não (OFF) [14]

2.4.3. MÉTODO ANALÍTICO

O método analítico tem por base uma escala de conforto térmico, presente na ASHRAE 55 e na ISO 7730, e que é apresentada no (Quadro 5).

Quadro 5 - Escala de conforto térmico (método analítico) [11] [15]

Quente	Morno	Ligeiramente Morno	Neutro	Ligeiramente Fresco	Fresco	Frio
+3	+3	+1	0	-1	-2	-3

A escala está relacionada com o PMV, *Predicted Mean Vote*, um índice que permite a previsão de valor médio dos votos (na escala apresentada no Quadro 5) de um vasto conjunto de pessoas, inseridas num dado ambiente [15]. Na determinação do PMV de acordo com a ISO 7730 [15] podem ser utilizadas três metodologias:

- Analiticamente tendo por base as equações fornecidas: (3), (4), (5) e (6);
- Utilizando os anexos fornecidos, que têm valores do PMV para diferentes combinações de atividade, resistência térmica de vestuário, temperatura operativa e velocidade do ar;
- Medição direta, utilizando sensores.

O PPD, *Predicted Percentage Dissatisfied*, é o índice que estabelece uma previsão quantitativa da percentagem de pessoas insatisfeitas termicamente, i.e., que escolheram os valores ± 3 e ± 2 na escala de conforto térmico (Quadro 5). Este índice é calculado através da equação (7) [11] [15]. A relação gráfica entre o PMV e o PPD está representada na (Figura 6).

$$PMV = [0.303 \cdot e^{(-0.036 \cdot M)} + 0.028] \cdot \left\{ \begin{aligned} & (M - W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a] - 0.42 \cdot [(M - W) - 58.15] \\ & - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot (5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ & - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \left\{ 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \right\} \quad (4)$$

$$h_c = \left\{ \begin{aligned} & 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} \xrightarrow{\text{para}} 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} \cdot 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ & 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \xrightarrow{\text{para}} 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} \cdot 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 \cdot I_{cl} \xrightarrow{\text{para}} I_{cl} \leq 0.078 m^2 \cdot K / W \\ 1.05 + 0.645 \cdot I_{cl} \xrightarrow{\text{para}} I_{cl} > 0.078 m^2 \cdot K / W \end{cases} \quad (6)$$

Em que,

M - Ritmo metabólico [W/m^2];

W - Trabalho [W/m^2];

I_{cl} - Isolamento térmico do vestuário [$m^2 \cdot K/W$];

f_{cl} - Fator da área da superfície do vestuário;

t_a - Temperatura do ar [$^{\circ}C$];

$\bar{t}_r$ - Temperatura média radiante [$^{\circ}C$];

v_{ar} - Velocidade do ar [m/s];

p_a - Pressão do vapor de água [Pa];

h_c - Fator de transferência do calor por convecção [$W/ m^2 \cdot K$];

t_{cl} - Temperatura da superfície do vestuário [$^{\circ}C$].

$$PPD = 100 - 98 \cdot e^{(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.217 \cdot PMV^2)} \quad (7)$$

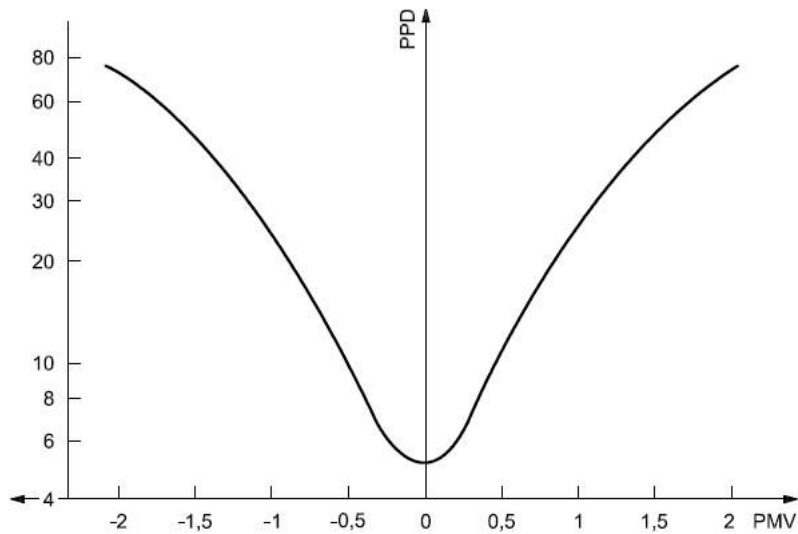


Figura 6 - Relação entre o PMV e PPD [15]

Tendo por base estes dois índices, a ISO 7730 define três categorias de ambiente térmico desejáveis, apresentadas no Quadro 6. As categorias podem ser definidas pelo conforto térmico do corpo como um todo, utilizando os valores de PPD e PMV ou de desconforto local, utilizando parâmetros locais específicos. Estas categorias são aplicáveis a indivíduos que se encontrem no mesmo ambiente térmico. Devido à precisão dos equipamentos medição pode ser difícil a verificação da categoria A, sendo que a ISO 7730 sugere que esta seja efetuada com a temperatura operacional [15].

Quadro 6 - Categorias de ambiente térmico (Adaptado de [15])

Categoria	PPD (%)	PMV
A	< 6	$-0,2 < PMV < +0,2$
B	< 10	$-0,5 < PMV < +0,5$
C	< 15	$-0,7 < PMV < +0,7$

2.5 TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS NA AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO

A termografia de infravermelhos é um método não invasivo que permite a determinação da temperatura da pele. O seu uso na avaliação de conforto térmico é, portanto, uma escolha possível. O rosto é a zona corporal que mais é utilizada para a avaliação do conforto térmico, porque não está coberta por roupa [18]. Contudo, a temperatura da roupa também já foi utilizada por alguns autores [19].

No rosto podem ser considerados vários pontos para avaliar a temperatura da pele e, consequentemente, determinar o conforto térmico, embora, das várias possibilidades, existam aquelas que se destacaram nos estudos efetuados por outros autores por permitirem uma maior precisão dos resultados.

Segundo Li et al [20], as orelhas, nariz e bochechas são os pontos que oferecem uma precisão média na avaliação da temperatura superficial de 85%. Esse estudo, refere quais foram as maiores variações de temperatura em aquecimento e arrefecimento. No aquecimento, o nariz, as bochechas e as orelhas foram as áreas que obtiveram maior variação de temperatura. Enquanto no arrefecimento, a maior variação ocorreu nas orelhas, seguido do nariz, das bochechas e da testa. A fiabilidade média dos resultados, segundo os autores deste estudo foi de 85%, sendo no aquecimento de 92.7% e no arrefecimento de 91.6%.

De acordo com Ghahramani et al [18], diferentes zonas individuais do rosto apresentam variações distintas em relação às mudanças das condições ambiente. A testa e a bochecha são as zonas com uma variação de temperatura menor, ao invés, do nariz e das orelhas que demonstraram uma maior variação de temperatura. A nível individual, o rosto não apresenta uma correlação com a temperatura ambiente. Contudo, utilizando a média dos pontos do rosto verifica-se uma correlação entre os dois parâmetros. Segundo Tejedor et al [19], a temperatura do nariz apresentou uma correlação de 95.14% com os incrementos de temperatura ambiente.

A temperatura de neutralidade térmica é um parâmetro que alguns estudos abordam. Segundo Ghahramani et al [18], verifica-se uma diferença relativa ao sexo, em que as mulheres apresentam uma temperatura mais baixa em relação aos homens. O estudo de Tejedor et al [19], aferiu que os valores obtidos de temperatura e humidade relativa ambiente, que representam a neutralidade térmica, são de 23.5°C e de 54%, respetivamente. A análise à temperatura da pele e do vestuário nestas condições foram também efetuadas, obtendo os valores de 35°C e 31°C, respetivamente.

2.6 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

A termografia de infravermelhos pode ser utilizada em humanos. Contudo, existem parâmetros que influenciam os resultados e podem ser agrupados em três categorias: os ambientais, referentes ao local do ensaio, os individuais referentes às características pessoais do indivíduo em estudo, e que podem ser divididos em intrínsecos e extrínsecos, e os técnicos, referentes aos equipamentos utilizados [21], de acordo com a Figura 7.

Ambientais	Individuais	Técnicos
• Tamanho da divisão; • Temperatura ambiente; • Humidade relativa; • Pressão atmosférica; • Fontes de radiação.	• Fatores intrínsecos: • Sexo; • Idade; • Antropometria; • Altura; • Peso; • Ritmo circadiano; • Densidade do cabelo; • Emissividade da pele; • Historial médico; • Metabolismo; • Circulação do sangue da pele; • Genética; • Emoções. • Fatores extrínsecos: • Ingestão de medicamentos, bebidas ou outros produtos que afetam a temperatura corporal temporariamente; • Aplicação diretamente na pele de produtos; • Tratamentos médicos; • Atividade física.	• Validação; • Fiabilidade do instrumento; • Protocolo; • Características da câmara; • Seleção das regiões de interesse; • Software; • Análise estatística.

Figura 7 - Parâmetros que influenciam a termografia de infravermelhos: ambientais, individuais e técnicos [21]

3

METODOLOGIA

3.1 OBJETIVOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos de ensaios e as metodologias para o tratamento de dados, bem como são descritas as características dos equipamentos utilizados na realização dos ensaios.

Os ensaios decorreram entre do dia 22 de março de 2021 e o dia 1 de abril de 2021, tendo sido precedidos por ensaios preliminares. Todos os ensaios e ensaios preliminares foram realizados no Laboratório de Física de Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LFC-FEUP).

O foco dos ensaios foi o rosto do indivíduo em estudo, com 24 anos, ou seja, o próprio autor desta dissertação. Foram utilizadas duas câmaras termográficas, com características diferentes, e a captação das imagens foi efetuada num ambiente controlado, i.e., no interior de uma câmara climática *walk-in*. A temperatura ambiente imposta variou dos 10°C aos 30°C e a humidade relativa (HR) dos 40% aos 80%. Cada combinação de temperatura e humidade relativa foi chamada de cenário, num total de 99 cenários.

Para o tratamento das imagens térmicas captadas foram utilizados os *softwares* de cada uma das câmaras termográficas. Adicionalmente, na análise das matrizes de temperaturas resultantes das imagens e das medições obtidas com outros equipamentos, o Excel, SPSS e Autocad foram os *softwares* utilizados.

Para a designação dos diferentes parâmetros, ambientais e superficiais, adotou-se a seguinte terminologia durante o tratamento dos resultados:

I. Parâmetros ambientais:

- HR de referência: Humidade relativa programada na câmara climática como set-point;
- Temperatura de referência: Temperatura programada na câmara climática como set-point;
- HR ambiente: Humidade relativa real, medida pelos sensores de temperatura e humidade relativa;
- Temperatura ambiente: Temperatura real, medida pelos sensores de temperatura e humidade relativa.

II. Parâmetros superficiais:

- Temperatura sem contacto: Temperatura medida na testa com o termómetro digital sem contacto;
- Temperatura com contacto: Temperatura medida na boca com o termómetro digital com contacto;
- Temperatura máxima NEC: Temperatura superficial do rosto referente ao ponto mais quente, medida com a câmara termográfica NEC;

- Temperatura máxima Fluke: Temperatura superficial do rosto referente ao ponto mais quente, medida com a câmara termográfica Fluke.

3.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os equipamentos utilizados durante a realização dos ensaios, fornecidos pelo Laboratório de Física de Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LFC-FEUP), foram os seguintes:

- Câmara Climática Hot Box Fitoclima 1000 EDTU;
- Câmara Termográfica Thermo Tracer TH9100 MR da NEC;
- Câmara Termográfica TiS60+ da Fluke;
- Sensores de temperatura e humidade relativa HOB0® Temp/RH 2.5% Data Logger (UX100-011);
- Termómetro digital de contacto;
- Termómetro digital sem contacto.

As câmaras termográficas utilizadas foram a Thermo Tracer TH9100 MR da NEC e TiS60+ da Fluke (Figura 8), cujas características principais estão listadas no Quadro 7. Relativamente à câmara NEC existe a necessidade de serem efetuadas as seguintes calibrações:

- REF CAL – Calibração de Reflexão: Efetuada 10 minutos após ligar a câmara, quando o equipamento se encontra estabilizado. É realizada com a tampa de proteção da lente colocada, sempre que a câmara seja desligada ou quando as condições ambiente se alteram drasticamente. Durante os ensaios efetuou-se este procedimento em todos os cenários.
- Compensação do Ambiente: Esta função serve para compensar o erro resultante da influência das condições ambiente, nomeadamente os valores da temperatura e HR ambiente. Durante os ensaios efetuou-se esta correção em todos os cenários.
- Compensação da Temperatura Refletida: Esta função visa compensar a reflexão pela superfície em estudo, da radiação emitida pelas superfícies vizinhas. Nesta calibração utilizou-se uma folha de alumínio, amarrotada e posteriormente alisada, e que foi fixada na porta. Tirando-se dois termogramas com emissividade igual a 1, de forma a avaliar a temperatura da folha de alumínio, que corresponde à temperatura refletida e que, na fase de tratamento de dados, foi inserida para correção das imagens térmicas.

Relativamente à câmara Fluke também é necessária uma compensação relativa à temperatura refletida, seguindo um procedimento idêntico ao descrito anteriormente.



(a)



(b)

Figura 8 - Câmaras termográficas: a) Thermo Tracer TH9100 MR da NEC; b) TiS60+ da Fluke

Quadro 7 - Características das câmaras termográficas [22].

	NEC	Fluke
Gama de medição	-20°C a 100°C	-20°C a 400°C
Resolução	0.06°C a 30°C	≤0.045°C a 30°C
Precisão	± 2°C ou ± 2%	± 2°C ou ± 2%
Detetor	FPA (microbolômetro)	FPA (microbolômetro)
Gama espectral	8 a 14 µm	7.5 a 14 µm
I.F.O.V.	1.2 mrad	1.86 mrad
Resolução térmica	320 x 240 pixels	320 x 240 pixels
Distância mínima de focagem	30 cm	< 46 cm
Campo de visão	20.1° x 22.7°	34.1° x 25.6°

A câmara climática Hot Box Fitoclima 1000 EDTU (Figura 9 a) permite controlar as condições ambiente: temperatura e humidade relativa. A variação de temperatura possível está compreendida entre -50°C e 180°C, tendo uma precisão de $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Relativamente à humidade relativa, está compreendida entre 10% e 98%, com uma variação de $\pm 2\%$. Está anexada a uma câmara visitável, com 2.00m x 2.00m x 1.20m, onde foram realizados os ensaios (Figura 9 b).

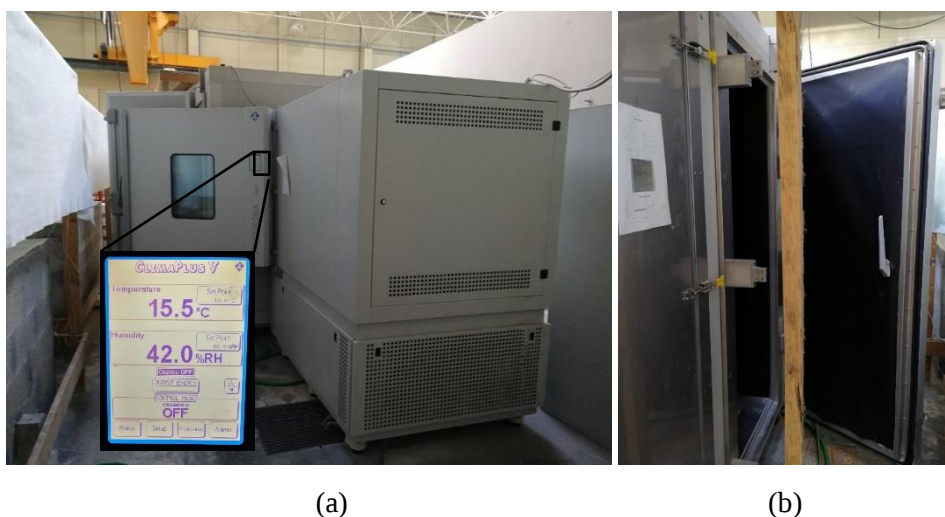


Figura 9 - Câmara climática: a) Hot Box Fitoclima 1000 EDTU com ecrã tátil de controlo; b) Entrada da parte visitável

Os sensores de temperatura e humidade relativa HOBO® Temp/RH 2.5% Data Logger (UX100-011) (Figura 10 a), utilizados para a medição das condições ambiente reais no interior da câmara climática, têm as características apresentadas no Quadro 8. Os termómetros digitais, com e sem contacto, utilizados no decorrer dos ensaios são equipamentos comuns, que podem ser adquiridos em qualquer farmácia ou parafarmácia (Figura 10 b e c). As suas características estão apresentadas no Quadro 9.

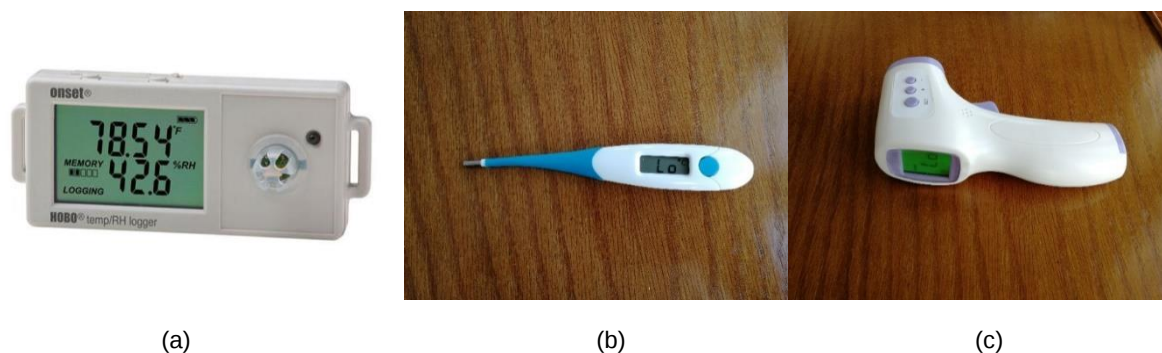


Figura 10 - Equipamentos: a) Sensor de temperatura e humidade relativa; b) Termómetro digital com contacto; c) Termómetro digital sem contacto

Quadro 8 - Características dos sensores de temperatura e humidade relativa [23].

	Sensor de temperatura	Sensor de humidade
Gama de medição	20° a 70°C	1% a 95%
Precisão	0.024°C a 25°C	±2.5% de 10% a 90%; ±5% <10% e >90%
Resolução	±0.21°C de 0° a 50°C	0.01%

Quadro 9 - Características dos termómetros

	Com contacto	Sem contacto
Gama de medição	32°C a 42.9°C	35°C a 42°C
Precisão	35°C a 39°C ± 0.1°C a 0.2°C, 39°C a 42.9°C ± 0.2°C	± 0.2°C

3.3. ENSAIOS PRELIMINARES

3.3.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Os ensaios preliminares visaram a preparação dos equipamentos e do local de ensaio. O ensaio preliminar aos termómetros digitais foi efetuado a 15 de março de 2021 e os restantes efetuados entre 18 e 20 de março de 2021.

O procedimento dos ensaios preliminares foi dividido em duas fases:

- Verificação dos equipamentos – termómetros digitais e câmaras termográficas;
- Preparação do local de ensaio.

3.3.2. VERIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

De forma a ser possível ter uma ideia da variação da temperatura corporal ao longo de um dia, foi realizado um ensaio preliminar no 15 de março de 2021 com os dois termómetros digitais, no qual se efetuaram várias medições pontuais. Foram também efetuadas duas medições de temperatura após a ingestão de uma bebida quente (café) e uma bebida fria (água fresca) (Quadro 10).

Os resultados do ensaio preliminar (Quadro 10 e Figura 11) mostram que, se não forem considerados os valores decorrentes da ingestão de bebidas quentes e frias, há um aumento gradual da temperatura até se atingir um pico durante a tarde, estando de acordo com a teoria do ciclo circadiano [24]. Considerando a ingestão de líquidos, observa-se um incremento de 1.6 °C após a ingestão da bebida quente e uma diminuição de 1 °C após a ingestão da bebida fria.

Quadro 10 - Resultados do ensaio preliminar com os termómetros digitais

Hora	Sem contacto	Com contacto	Diferença	Notas
11:00	35.5	36.4	0.9	
13:00	35.5	36.2	0.7	Após Almoço
13:10	35.6	37.8	2.2	Após Café
14:00	35.6	36.3	0.7	
15:00	35.4	36.5	1.1	
16:00	35.5	36.7	1.2	
17:00	35.6	36.7	1.1	
18:00	35.5	36.7	1.2	
19:00	35.5	36.5	1.0	
20:00	35.4	36.5	1.1	Após Jantar
21:40	35.5	36.4	0.9	
00:00	35.6	36.4	0.8	
00:00	35.5	35.4	-0.1	Após Água

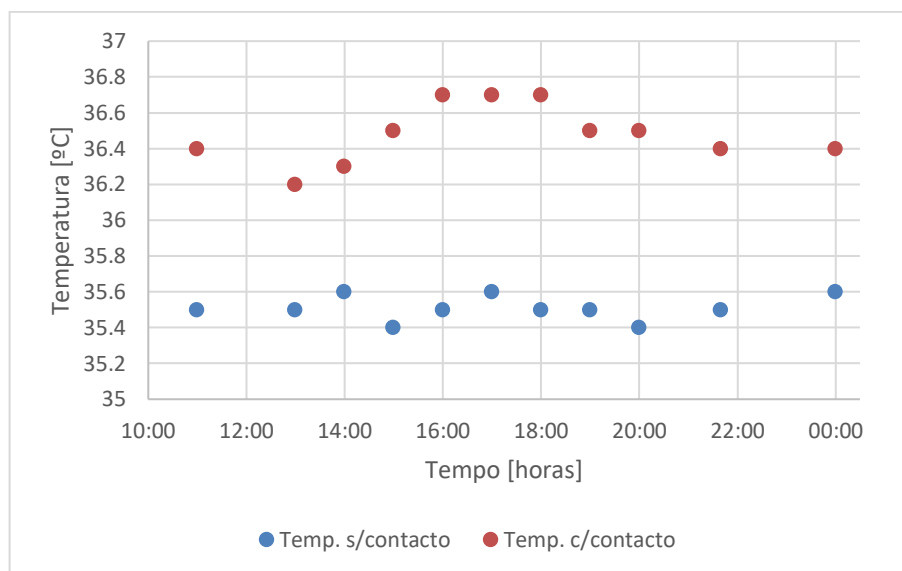


Figura 11 - Variação da temperatura medida com os termómetros digitais ao longo de um dia (excluindo os valores após a ingestão de bebidas quente e fria)

A verificação das câmaras termográficas incidiu no estudo prévio dos respetivos manuais e, posteriormente, a verificação das câmaras in situ, onde foi avaliada a duração da programação das câmaras, a focagem e a duração da passagem das imagens das câmaras para o computador. Esta verificação foi realizada nos dias 18 e 20 de março de 2021. Só depois de afinados estes procedimentos foi possível definir o plano da campanha experimental e os procedimentos do ensaio.

3.3.3. PREPARAÇÃO DO LOCAL DE ENSAIO

A preparação do local de ensaio dividiu-se em três fases: proteção das paredes metálicas da câmara climática com material de elevada emissividade, criação de suportes de fixação das câmaras termográficas e montagem dos equipamentos. Decorreu durante os dias 18 e 20 de março de 2021.

Na proteção das paredes da câmara climática foi utilizada cartolina e tela preta, fixadas com fita cola. Foram cobertas todas as superfícies dentro do ângulo de visão das câmaras termográficas.

Tendo em conta o espaço disponível dentro da câmara climáticas, as duas câmaras termográficas foram colocadas sobre uma estante de plástico, devidamente estabilizada (Figura 12 c). Foram construídos suportes específicos para que fosse possível apoiar e fixar as câmaras termográficas, que se manteve durante toda a campanha experimental (Figura 12 a e b). Devido às características específicas da câmara Fluke, que não permite uma estabilização sobre uma superfície plana, as imagens térmicas por ela captadas ficaram com a zona de interesse descentrada e com uma inclinação acentuada (Figura 13).

No interior da câmara climática foram colocados dois sensores de temperatura e humidade relativa, um junto às câmaras de infravermelhos e outro junto à ventoinha da câmara climática. Por fim, a montagem dos equipamentos ficou concluída após se ter determinado a posição da cadeira, onde ficaria o indivíduo em estudo durante a captação das imagens, para permitir o enquadramento correto da posição cara em ambas as câmaras. A Figura 14 mostra sequencialmente a disposição dos equipamentos no interior da câmara climática.

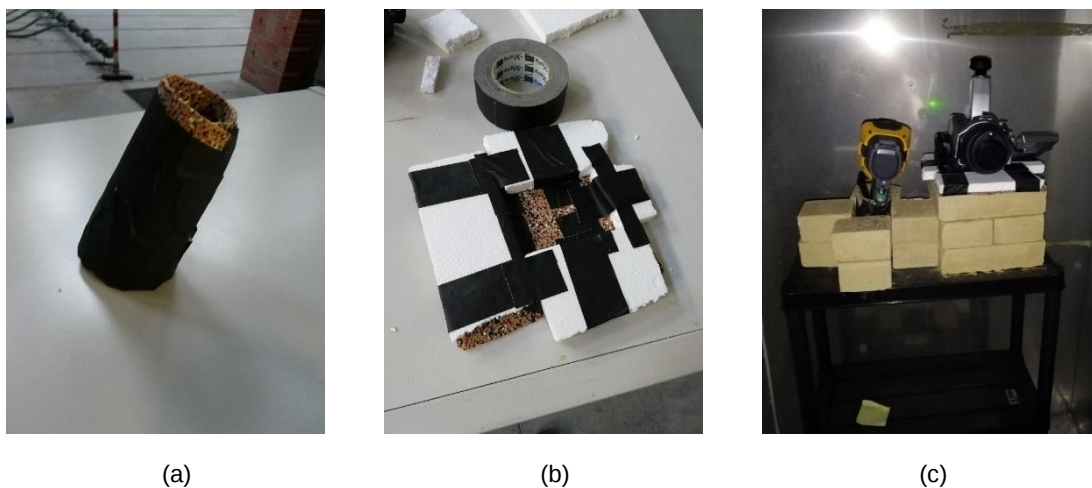


Figura 12 - Estabilização das câmaras termográficas: a) Suporte da câmara Fluke; b) Suporte da câmara NEC; c) Posição das câmaras termográficas nos devidos suportes



Figura 13 - Imagens térmicas captadas com a: a) Câmara NEC; b) Câmara Fluke

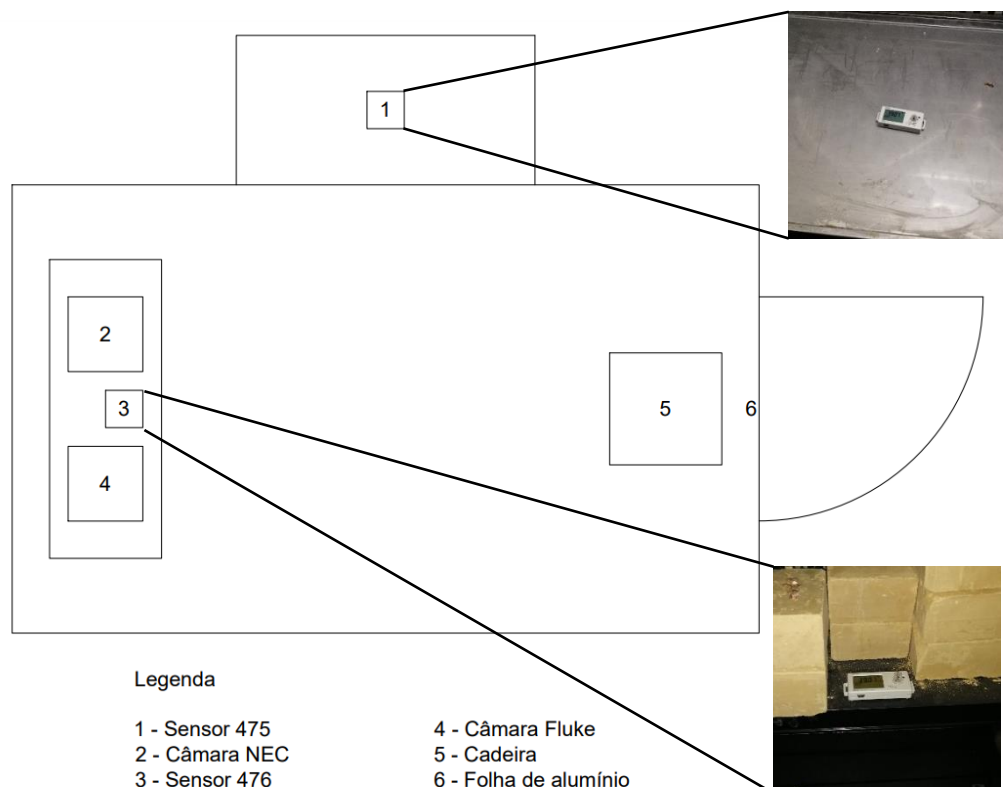


Figura 14 - Esquema com a disposição dos equipamentos no interior da câmara climática

3.4. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados entre 22 de março de 2021 e 1 de abril de 2021, durante os quais foram efetuados 11 cenários por dia. Cada cenário correspondia a uma combinação de humidade relativa e temperatura. A humidade relativa variou entre 40% e 80%, com incrementos de 5% e a temperatura variou entre 10°C e 30°C com incrementos de 2°C.

Devido a atrasos no primeiro dia (HR = 40%), dos 11 cenários previstos só se realizaram 7, tendo sido os restantes 4 distribuídos por 3 dias (de 29 a 31 de abril de 2021), sendo efetuados após a conclusão dos cenários previstos para o dia em questão.

No primeiro dia de ensaios, a câmara climática foi ligada para a primeira combinação de humidade relativa e temperatura, mantendo-se ligada continuamente durante toda a duração dos ensaios, embora com variações das condições climáticas.

Os procedimentos durante cada um dos cenários foram cíclicos (Figura 15) e consistiram nos seguintes pontos:

1. Programação da câmara climática para o cenário desejado;
2. Estabilização no interior da câmara climática das condições correspondentes ao cenário desejado;
3. Entrada do indivíduo em estudo na câmara climática;
4. Ligar câmaras termográficas;
5. Aclimatização durante 10 minutos, sendo verificada a integridade da proteção das paredes metálicas da câmara climática, efetuados os procedimentos de calibração da câmara NEC e ajustada a posição da cadeira, câmaras e folha de alumínio;

6. Focagem manual da câmara NEC;
7. Captação de duas imagens térmicas à folha de alumínio com cada câmara termográfica (Figura 16);
8. Captação de seis imagens térmicas à cara com cada câmara termográfica espaçadas em intervalos de 30 segundos, através de programação automática;
9. Desligar as câmaras termográficas e saída do indivíduo em estudo da câmara climática;
10. Programação a câmara climática para o cenário seguinte.

A existência das restrições devido à Covid-19 e a necessidade de implementação de medidas de segurança, impossibilitou a presença de uma segunda pessoa na câmara climática, sendo a focagem da câmara NEC efetuada através da colocação da mão na zona aproximada onde a cara iria ficar.

A adoção dos 10 minutos de aclimatização teve em vista a realização dos 11 cenários por dia em função do tempo disponível.



Figura 15 - Esquema do ciclo de ensaios



Figura 16 - Posição da folha de alumínio na porta

Devido à influência da roupa no conforto térmico, existiu uma adaptação do vestuário às condições climáticas no interior da câmara. Essa adaptação incidiu apenas no casaco e camisola, sendo as restantes peças de vestuário constantes ao longo dos ensaios. A adaptação variou consoante a temperatura de referência, sendo a seguinte:

- 10°C a 14°C: Polo de manga curta + Camisola intermédia + Casaco;
- 16°C a 24°C: Polo de manga curta + Camisola intermédia;
- 26°C a 30°C: Polo de manga curta.

Os tecidos de que são feitos o polo de manga curta e a camisola intermédia são de 100% de algodão enquanto a do casaco é constituído por algodão e poliéster.

Os ensaios com termómetros digitais foram realizados para os cenários correspondentes aos valores de humidade relativa de referência de 40%, 60% e 80%, tendo sido efetuados antes da captação das respetivas imagens térmicas. Estes ensaios efetuaram-se após os 10 minutos de aclimatização, com a medição da temperatura da testa com o termómetro sem contacto, afastado cerca de 2cm e da temperatura da boca, com o termómetro com contacto. Nesta última medição, a boca foi mantida fechada durante os 2 minutos anteriores à medição, tal como recomendado nas informações técnicas.

3.5. TRATAMENTO DOS DADOS

3.5.1. CORREÇÃO E SELEÇÃO DAS IMAGENS

Nesta fase foi utilizado o *software InfReC Analyzer NS9500 Standard* para as imagens da câmara NEC e o *software SmartView 4.3* para as imagens da câmara Fluke. O procedimento iniciou-se com a determinação das temperaturas refletidas para cada um dos cenários e para cada uma das câmaras termográficas. Em todas as imagens térmicas da folha de alumínio foi definida uma área semelhante e adotado, para essa área, o valor de 1 para a emissividade (Figura 18). Nas imagens da câmara NEC o processo de obtenção da temperatura refletida consistiu, com o próprio programa, desenhar uma caixa com a mesma dimensão para todas as imagens, calculando-se posteriormente o valor médio das temperaturas nessa caixa. Nas imagens da câmara Fluke o processo foi diferente devido à impossibilidade de desenhar uma caixa com a mesma quantidade de pixels para todos os cenários. Como tal, foi desenhada uma caixa que apenas incluía a folha de alumínio e exportado o ficheiro csv correspondente para o Excel, onde foi escolhida uma matriz de temperaturas de igual dimensão para todos os cenários e calculado o valor médio dessas temperaturas. Com os valores das temperaturas refletidas, foram corrigidas as imagens térmicas captadas durante os diferentes cenários.

Os sensores de temperatura e humidade foram colocados em posições diferentes para existir redundância no caso de algum dos equipamentos não estar a funcionar corretamente. Uma análise prévia da temperatura ambiente demonstrou que ambos os equipamentos mostram uma linha de tendência igual, apresentada no gráfico da Figura 17 a). Porém os valores são diferentes, o que poderá estar relacionado com o grande volume da câmara climática, que impede que se atinjam os *set-points* estabelecidos. Por isso, na interpretação dos resultados apenas se considerou o sensor 476, que está mais próximo do indivíduo em estudo. Quanto à humidade relativa, o sensor 475 encontra-se mais próximo da ventoinha (Figura 14) apresentando valores inferiores ao sensor 476, com a exceção dos três valores iniciais (Figura 17 b)). Pontualmente alguns valores dos sensores registaram valores *outliers* como os da temperatura de referência de 26°C e 30°C.

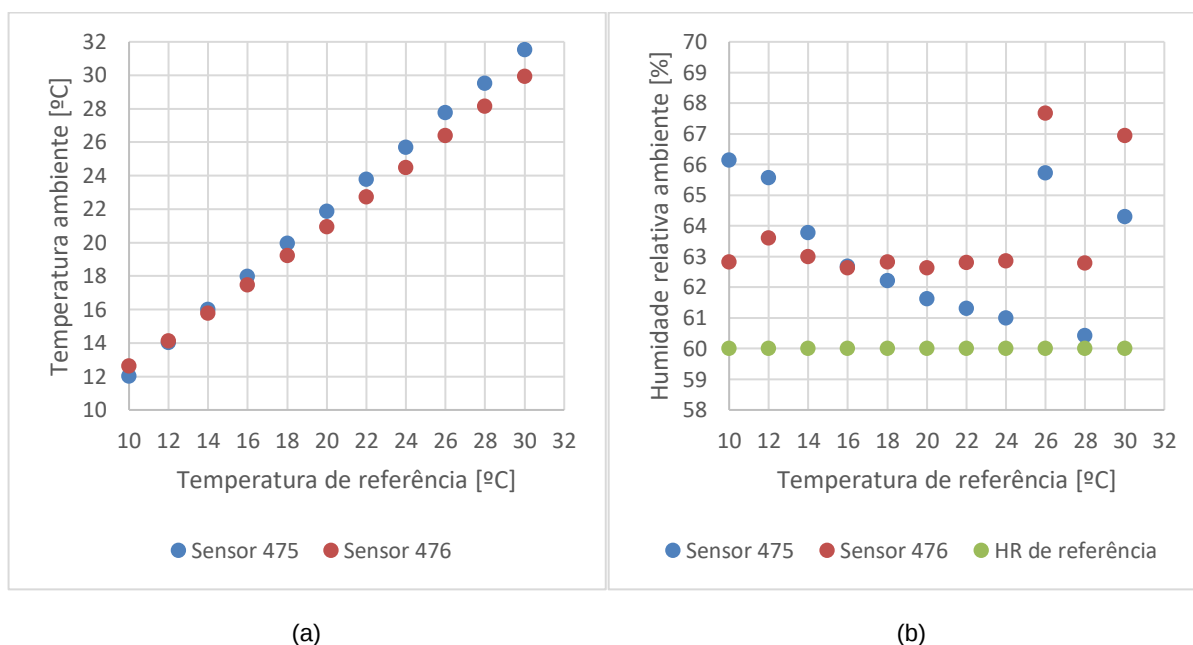


Figura 17 - Gráficos de comparação do sensor 475 e 476 durante os cenários de humidade relativa de referência 60% para: a) Temperatura; b) Humidade relativa

Para a determinação das condições climáticas em cada cenário, utilizaram-se os valores medidos pelos sensores de temperatura e humidade relativa, e não os *set-points* definidos no painel de controlo da câmara climática, considerando o valor médio correspondente ao período de medição (2 minutos e 30 segundos para cada ensaio).

Das seis imagens térmicas tiradas ao rosto em cada cenário, foram descartadas a primeira e, por vezes, a segunda, uma vez que foram captadas no momento imediato ao início da programação das câmaras termográficas, sem que indivíduo em estudo estivesse sentado na cadeira e perfeitamente imóvel ou com a cara corretamente enquadrada na imagem térmica. Das quatro a cinco válidas, apenas uma foi selecionada, tendencialmente a central, uma vez que do ponto de vista qualitativo são todas semelhantes, localizando-se o ponto mais quente sempre na mesma posição e apresentando valores muito próximos (Figura 19).

Após a escolha das imagens, efetuou-se a correção da compensação da temperatura refletida. Para tal, foram inseridos os valores da temperatura refletida, do respetivo cenário e câmara, nas imagens escolhidas.

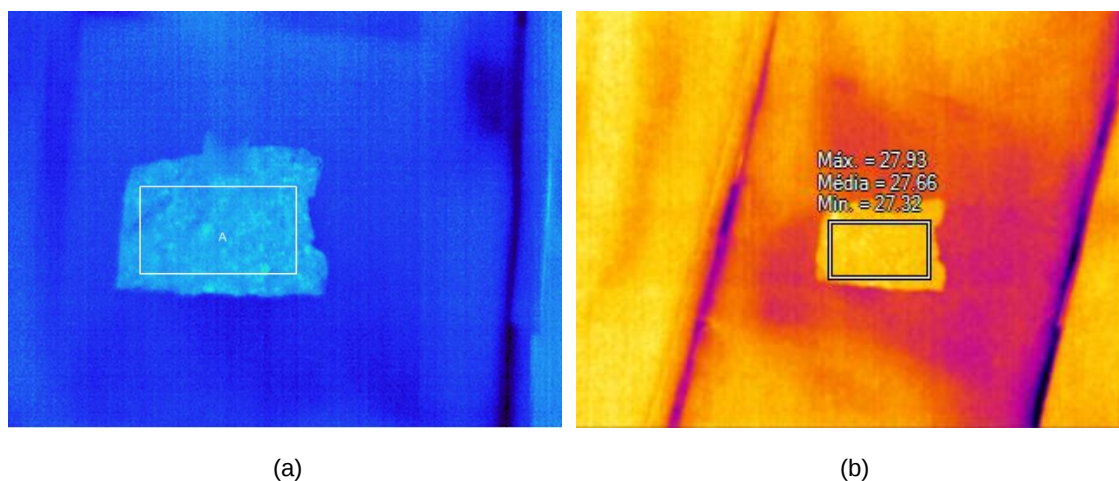


Figura 18 - Termogramas à folha de alumínio captados com a: a) Câmara NEC; b) Câmara Fluke

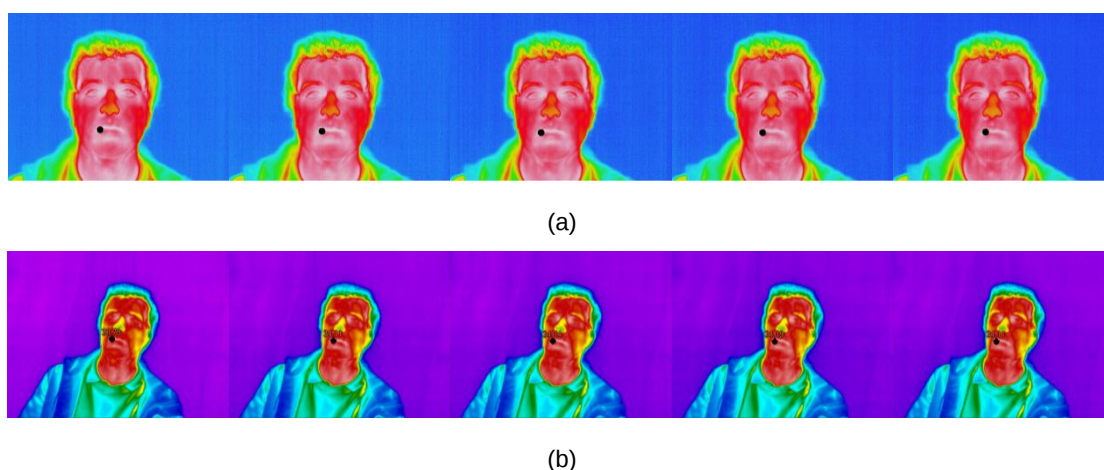


Figura 19 - Imagens térmicas captadas durante os cenários 65% e 14°C, com a localização do ponto mais quente (ponto preto): a) Pela câmara NEC; b) Pela câmara Fluke

3.5.2. COMPARAÇÃO DAS DUAS CÂMARAS TERMOGRÁFICAS

A comparação das duas câmaras termográficas foi efetuada de duas maneiras: qualitativa e quantitativa, tendo por base os pontos quentes (localização e valor). Na análise qualitativa foram estudadas uma seleção de algumas imagens térmicas captadas por ambas as câmaras termográficas. Seguiu-se uma análise quantitativa, na qual foram utilizados o Excel e o SPSS. No Excel foram efetuados gráficos para verificar a evolução do valor da temperatura correspondente ao ponto mais quente, em função da temperatura ambiente e humidade relativa ambiente, tendo sido também considerados os valores obtidos com os termómetros digitais. No SPSS foi efetuada uma análise descritiva das diversas variáveis em estudo, bem como representações gráficas da distribuição das temperaturas correspondentes aos pontos mais quentes. Foram também localizados, para cada câmara e por HR de referência, os pontos mais quentes na cara com recurso ao Autocad. Utilizou-se como base as temperaturas de referência, tendo-se representado as temperaturas mais baixas com cores frias (azuis) e as temperaturas mais elevadas com cores quentes (vermelhas). A temperatura intermédia de 20°C foi marcada a cor roxa. De forma a garantir que a localização não era afetada por alterações da posição do rosto, foi definido o referencial apresentado na Figura 20.

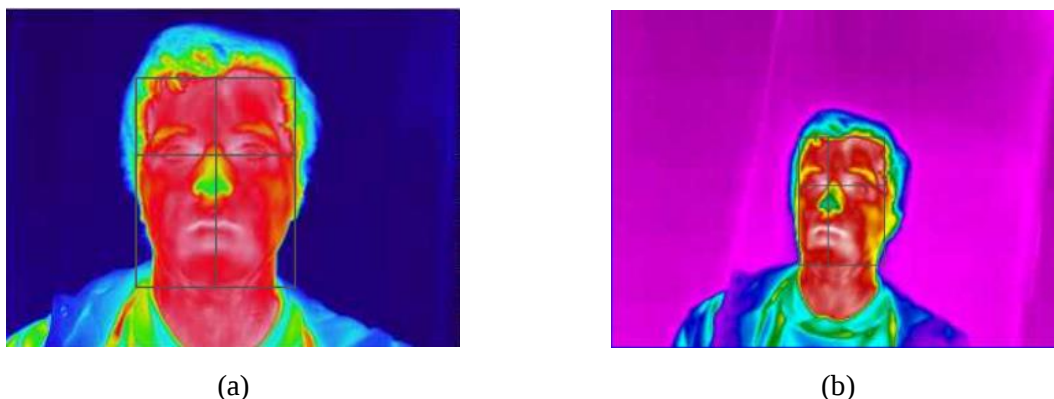


Figura 20 - Referencial utilizado para a câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke

3.5.3. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

Para a avaliação do conforto térmicos apenas imagens captadas pela câmara termográfica NEC foram utilizadas, devido à posição mais frontal e enquadradas da área de interesse e para simplificação dos processos. Para esta análise foi considerada todo o rosto, mas também mais zonas específicas, através da criação de caixas com formas geométricas adaptadas a cada região do rosto. Para toda a cara foi escolhida uma elipse, para o nariz um triângulo, para a testa um retângulo, para o queixo um trapézio e para as bochechas um polígono irregular (Figura 21). Todas as caixas mantiveram a mesma forma e dimensão em todos os cenários. Para cada caixa e em cada cenário foi retirado o ficheiro csv com as temperaturas correspondentes aos vários pixéis que as constituem sendo posteriormente efetuado o cálculo da média das temperaturas de cada caixa.

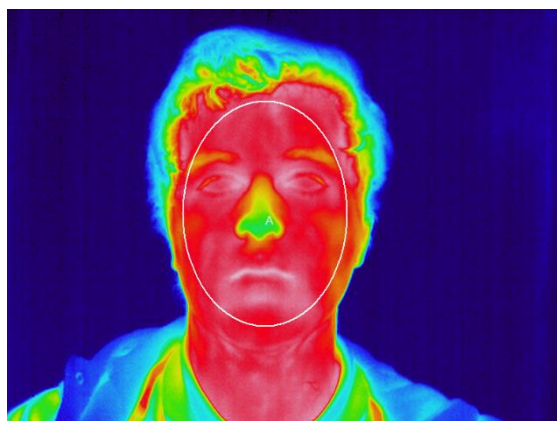
O estudo do comportamento térmico incidiu na análise dos valores médios das caixas e a sua comparação com o valor do PMV e PPD calculados de acordo com as equações incluídas na norma ISO 7730 [15] e descritas no Capítulo 2 nas equações (3), (4), (5) (6). O PPD foi calculado com recurso à equação (7), referida no capítulo do estado de arte, e teve por base os valores de resistência térmica do vestuário da ISO 7730. As combinações tiveram em conta as adaptações do vestuário às variações de temperatura, pelo que existiram três combinações diferentes. Além deste valor foi considerado um valor de repouso para o parâmetro do metabolismo.

A análise teve por base um cálculo do PMV com recurso a uma folha de Excel. Com estes valores efetuou-se uma análise no SPSS para cada um dos valores médios das caixas em relação ao valor PMV. No cálculo do PMV alguns dos parâmetros mantiveram-se constantes para todos os cenários enquanto outros variaram. Os parâmetros constantes são a velocidade do ar, considerada 0.05 m/s e o metabolismo de 1.0 met (Quadro 2). Quanto aos que variaram foram os seguintes:

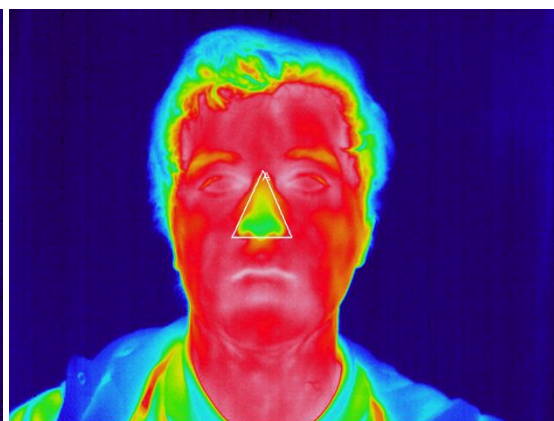
- Temperatura ambiente: varia em cada cenário e foram utilizados os respetivos valores medidos com os sensores;
- Temperatura média radiante: varia em cada cenário, sendo considerada igual à temperatura ambiente;
- Humidade relativa: varia em cada cenário e foram utilizados os respetivos valores medidos com os sensores;
- Resistência térmica do vestuário: varia de acordo com a adaptação do vestuário utilizado nas temperaturas de referência. Estes valores foram obtidos através da norma ISO 7730 efetuando o somatório das resistências térmicas e a influência da cadeira de madeira (Quadro 11).

Quadro 11 - Resistência térmica do vestuário segundo a norma ISO 7730 [15]

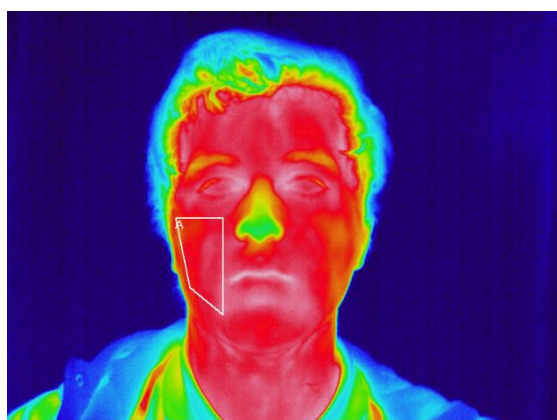
Resistência térmica [clo]		10°C a 14°C	16°C a 24°C	26°C a 30°C
Cadeira de madeira	0.01	x	x	x
Roupa interior	0.10	x	x	x
Camisa de manga curta	0.15	x	x	x
Calças normais	0.25	x	x	x
Meias	0.02	x	x	x
Botas	0.10	x	x	x
Camisola fina	0.20	x	x	-
Casaco impermeável	0.30	x	-	-
Total [clo]	-	1.13	0.83	0.63



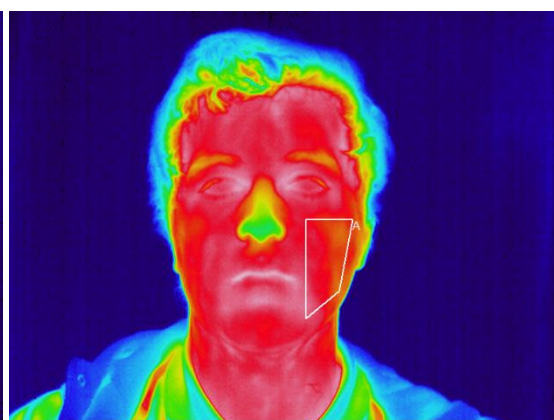
(a)



(b)



(c)



(d)

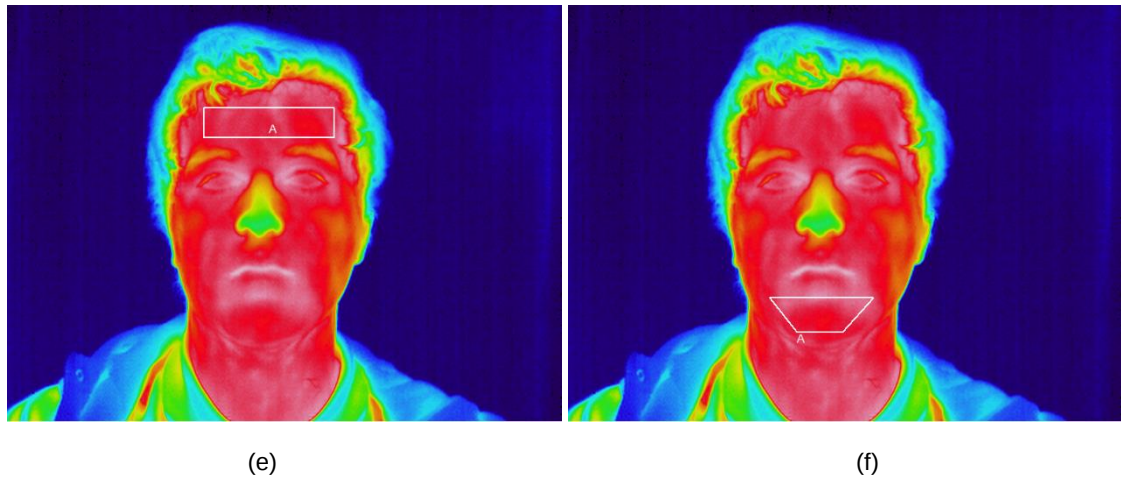


Figura 21 - Formas das caixas para a avaliação do conforto térmico. a) Cara; b) Nariz; c) Bochecha direita; d) Bochecha esquerda; e) Testa; f) Queixo

4

COMPARAÇÃO DAS DUAS CÂMARAS TERMOGRÁFICAS

4.1. OBJETIVOS

Neste capítulo serão apresentadas as análises qualitativa e quantitativa efetuadas para a comparação das duas câmaras termográficas. Enquanto, na análise qualitativa a comparação focou-se no estudo de algumas imagens térmicas captadas por ambas as câmaras termográficas, na análise quantitativa a comparação focou-se na localização e valores dos pontos mais quentes. Na análise qualitativa foram ainda analisados os dados obtidos por todos os equipamentos e a sua relação com os valores obtidos pelas duas câmaras termográficas. Os *softwares* utilizados foram o SPSS e o Excel, estabelecendo uma significância $\alpha=5\%$ para todos os testes estatísticos.

No Capítulo 3 foi referido que se captaram seis imagens térmicas. Devido ao facto da primeira imagem ser captada no momento imediato da programação e a segunda não apresentar o correto enquadramento da cara aquando da sua obtenção, apenas quatro a cinco imagens são válidas. Desse conjunto de imagens válidas, foi selecionada uma da qual foram utilizados os dados para o cenário correspondente em todas as análises efetuadas.

4.2. ANÁLISE QUALITATIVA

Na análise qualitativa será apresentada uma seleção de imagens térmicas captadas pelas câmaras termográficas NEC e Fluke. Foram selecionadas imagens dos cenários com a temperatura e humidade relativa de referência de 10°C-70%, 16°C-40%, 20°C-80%, 24°C-50% e 30°C-60%. As escolhas das temperatura e humidade relativa de referência visaram avaliar os valores extremos do intervalo estabelecido com alguns valores intermédios, sendo a escolha da combinação aleatória de modo a obter uma amostra com variabilidade representativa dos ensaios. Será também apresentado um dia completo de ensaios, correspondente à humidade relativa de referência de 40%, de modo a mostrar a evolução das imagens térmicas captadas com o aumento da temperatura da câmara climática. As restantes imagens térmicas são apresentadas no ANEXO “Termogramas captados”.

Na Figura 22 são apresentadas as imagens térmicas captadas por ambas as câmaras termográficas no cenário com temperatura de referência de 10°C. Observa-se alguma heterogeneidade da temperatura do rosto, sendo possível destacar as zonas frias e quentes do rosto. As zonas quentes identificadas são: a testa, os olhos e a boca e as zonas frias são o nariz, as bochechas e o queixo.

A testa apresenta temperatura mais elevadas nos extremos laterais, direito e esquerdo, com exceção na Fluke que, devido à sua inclinação apenas capta um dos extremos, o esquerdo. Estes extremos da testa

têm valores de aproximadamente 34°C, enquanto as restantes áreas da testa apresentam valores próximos dos 31°C. Os olhos têm a sua maior temperatura no canto com o nariz e a boca apresenta uma área com temperatura mais elevada em seu redor.

O nariz surge como a zona mais fria da cara toda, aproximadamente 22°C, com as bochechas a terem a segunda temperatura mais baixa, aproximadamente 28°C, o que está em concordância com os valores que foram encontrados na bibliografia [20]. O queixo apresenta valores entre os 28°C e 29°C.

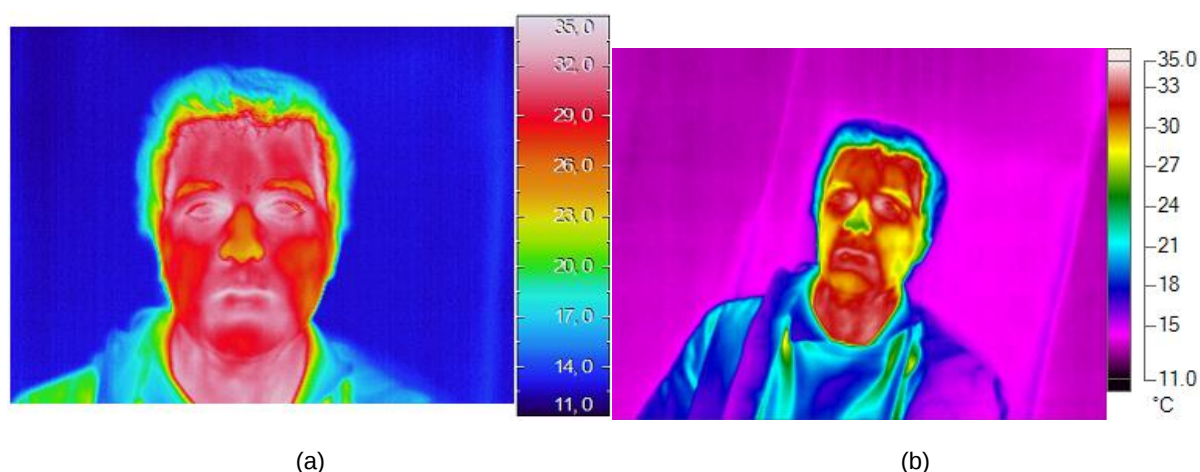


Figura 22 - Imagens térmicas do cenário 10°C - 70% captadas pela câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke

Na Figura 23 a temperatura de referência é de 16°C e, relativamente à Figura 22, existem diferenças de temperatura em relação ao queixo que apresenta valores mais próximos dos pontos mais quentes na cara. Os extremos da testa têm valores na ordem dos 34°C, mantendo-se semelhantes aos da Figura 22, enquanto o queixo apresenta valores na ordem dos 29° a 30°C. Este aumento foi verificado em todos os ensaios, o que poderá ser justificado pelo uso contínuo da máscara fora do ambiente da câmara climática e o tempo de aclimatização de 10 minutos não serem suficientes para mitigar a influência da máscara na temperatura do rosto.

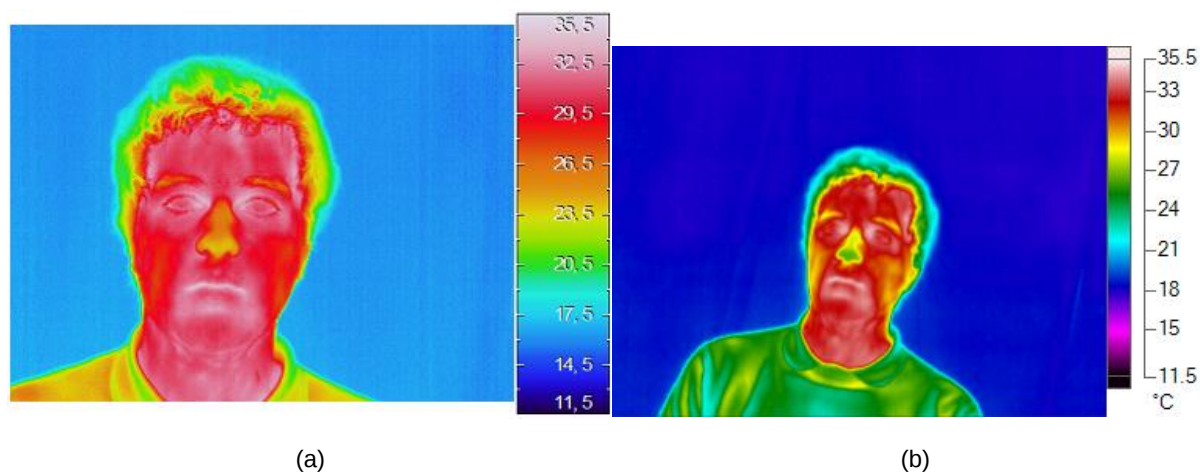


Figura 23 - Imagens térmicas do cenário 16°C - 40% captadas pela câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke

Na Figura 24 a temperatura de referência é de 20°C, que é o valor intermédio dos ensaios para cada um dos valores de humidade relativa de referência. Comparativamente com as imagens anteriores, o nariz e bochechas continuam a apresentar as temperaturas mais baixas, com as bochechas a terem uma aproximação da temperatura às zonas mais quentes do rosto. O nariz apresenta uma temperatura de aproximadamente 29°C, um aumento considerável em relação ao apresentado na Figura 22, e as bochechas têm valores entre os 30°C e 31°C.

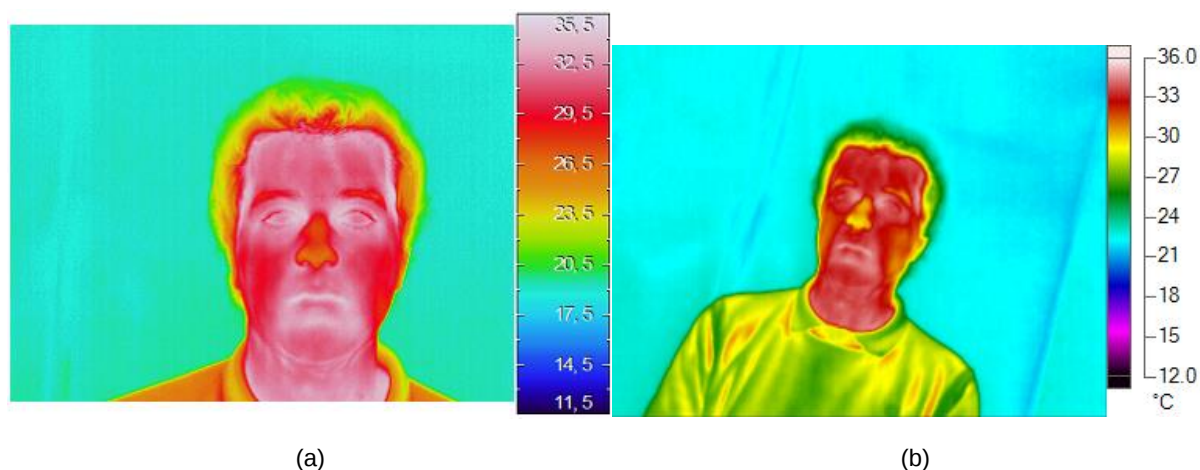


Figura 24 - Imagens térmicas do cenário 20°C - 80% captadas pela câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke

Na Figura 25 a temperatura de referência é de 24°C e começa a existir uma maior homogeneização das temperaturas do rosto. O queixo é agora uma das zonas mais quentes da cara, apresentando temperaturas equivalentes às atingidas na testa. As bochechas apresentam uma temperatura de cerca de 32°C, o que representa um aumento em relação ao apresentado na Figura 24, onde se obteve temperaturas de aproximadamente 29°C sendo desta forma, mais próximas dos valores de cerca de 34°C da testa. O nariz apresenta três temperaturas distintas: uma superior, uma central e uma inferior, podendo ser resultantes do uso de máscara.

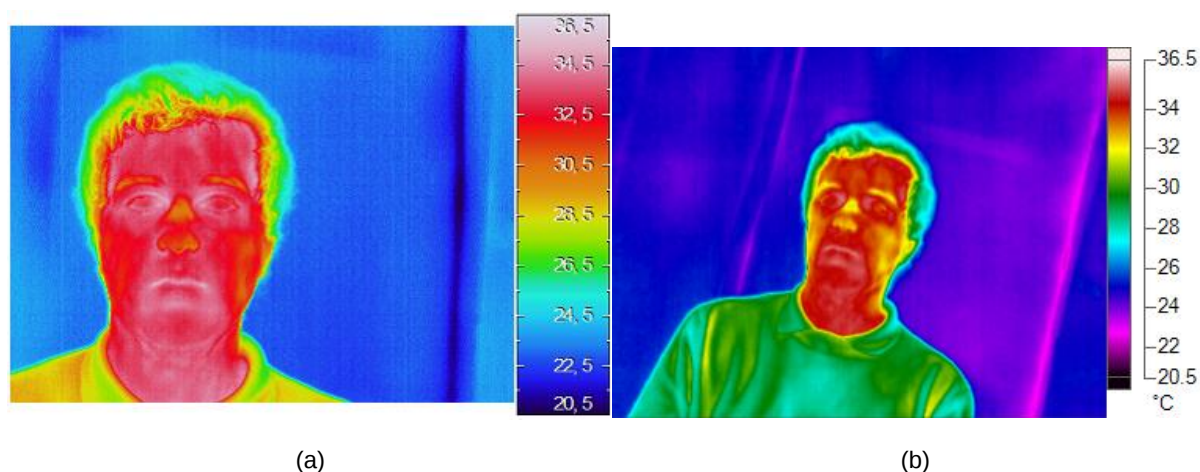


Figura 25 - Imagens térmicas do cenário 24°C - 50% captadas pela câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke

Na Figura 26, a temperatura de referência é de 30°C, que é o valor mais elevado do intervalo de temperaturas. Observa-se uma maior homogeneização das imagens térmicas captadas por cada uma das câmaras termográficas, pelo que é difícil distinguir grandes diferenças de temperatura no rosto. As zonas mais frias (Figura 22) agora exibem valores muito mais próximos das zonas mais quentes, com a testa a apresentar temperaturas entre os 34°C e os 36°C e o nariz entre sensivelmente os 33°C e os 34°C. Estas duas zonas eram as correspondentes aos valores extremos frio e quente apresentados nas figuras anteriores. Pode assim ser concluído que as temperaturas do rosto, em condições de temperatura elevada, não apresentam diferenças consideráveis entre si, ou seja, existe uma homogeneização dos resultados.

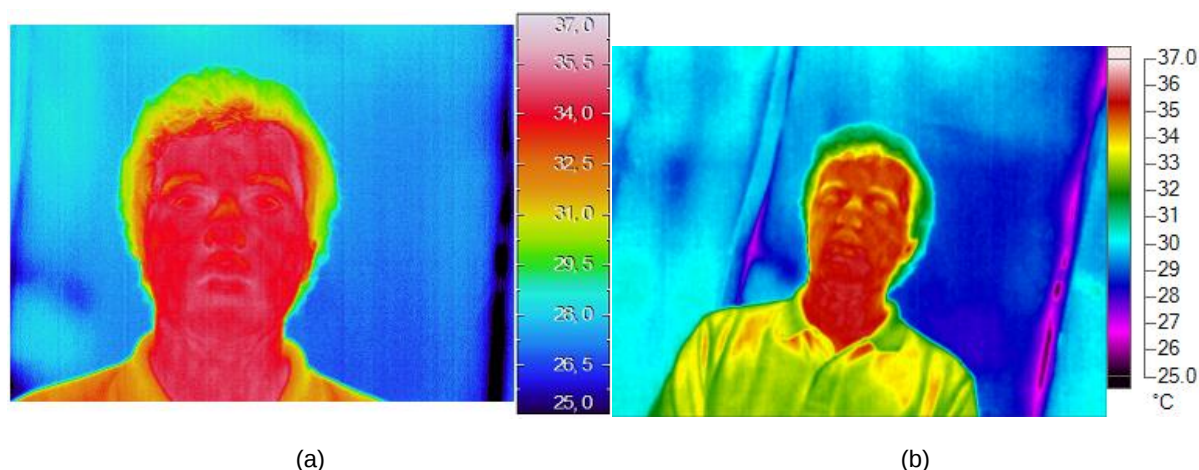
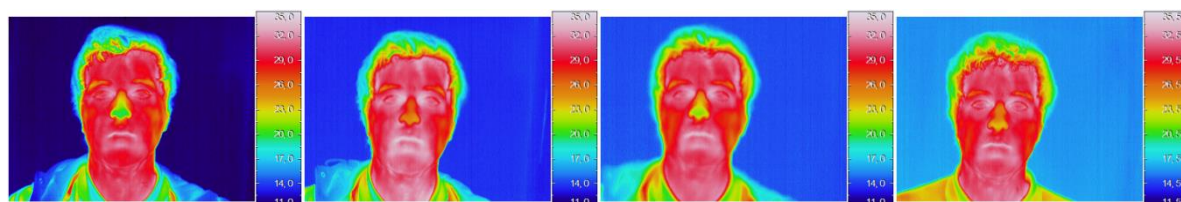


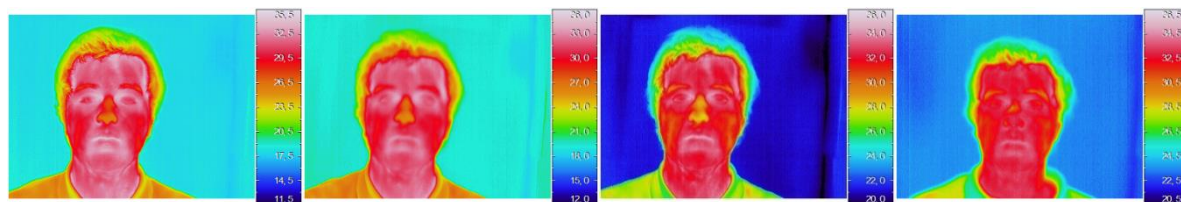
Figura 26 - Imagens térmicas do cenário 30°C - 60% captadas pela câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke

Na Figura 27 e na Figura 28 são apresentadas as imagens térmicas correspondentes à humidade relativa de referência de 40% para as câmaras termográficas NEC e Fluke, respetivamente. Nestas figuras observa-se a evolução das temperaturas do rosto descritas anteriormente neste subcapítulo, destacando a maior heterogeneidade para temperaturas mais baixas e a maior homogeneidade para mais altas. Devido aos ensaios serem realizados com temperatura crescente e as câmaras termográficas não serem retiradas do interior da câmara climática entre ensaios, não existindo, assim, arrefecimento das câmaras termográficas, pode colocar-se a hipótese deste facto ter alguma influência na homogeneidade das imagens térmicas correspondentes às temperaturas mais elevadas.

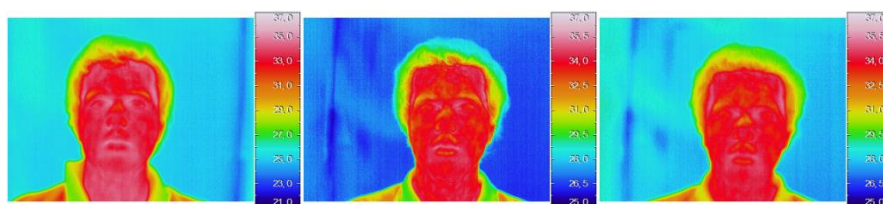
Na comparação dos valores apresentados na Figura 27 com os da Figura 28 constata-se que a câmara termográfica NEC, devido à sua posição frontal e maior enquadramento da mesma, leva a uma melhor interpretação das imagens captadas. A inclinação acentuada da câmara termográfica Fluke impede a leitura em zonas do rosto não abrangidas e uma maior dificuldade de leitura das imagens térmicas. Também se pode concluir que a homogeneidade da temperatura do rosto ocorre aproximadamente nos cenários com temperaturas que oscilam de 24°C a 26°C. Observa-se que em humidades relativas de referência distintas existe o mesmo comportamento, como apresentado na Figura 25.



(a)

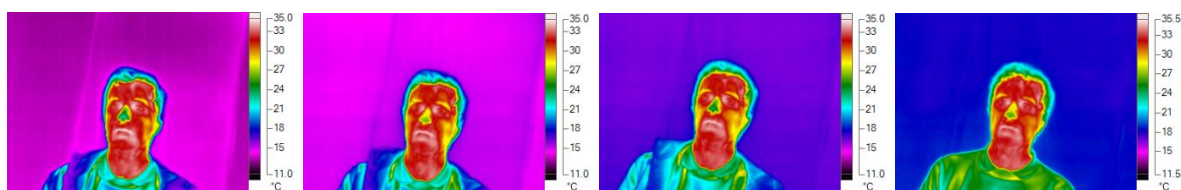


(b)

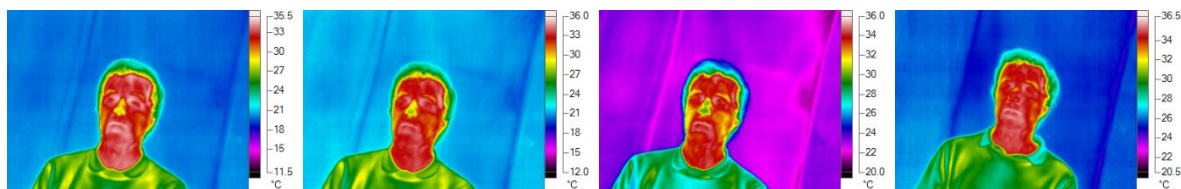


(c)

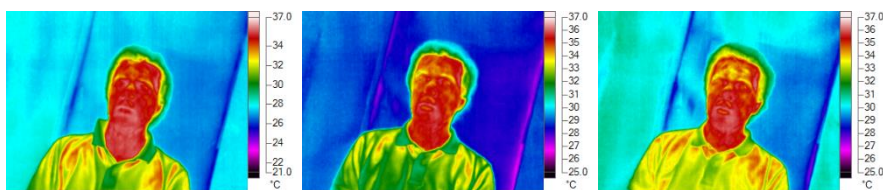
Figura 27 - Imagens captadas pela câmara termográfica NEC durante os ensaios de humidade relativa de referência 40% para as temperaturas: a) 10°C a 18°C; b) 20°C a 24°C; c) 26°C a 30°C



(a)



(b)



(c)

Figura 28 - Imagens captadas pela câmara termográfica Fluke durante os ensaios de humidade relativa de referência 40% para as temperaturas: a) 10°C a 18°C; b) 20°C a 24°C; c) 26°C a 30°C

4.3. ANÁLISE QUANTITATIVA

Neste subcapítulo irão ser apresentadas as análises quantitativas que foram efetuadas no estudo dos parâmetros ambientais e superficiais obtidos através dos equipamentos e câmaras termográficas no decorrer dos ensaios. A comparação entre as duas câmaras termográficas será efetuada através dos valores e localizações dos pontos mais quentes.

4.3.1. ANÁLISE DESCRITIVA DOS PARÂMETROS AMBIENTAIS E SUPERFICIAIS

No presente subcapítulo efetuou-se uma análise dos parâmetros ambientais, temperatura e humidade relativa de referência e ambiente, assim como dos parâmetros superficiais, temperatura refletida e temperatura máxima captada por cada uma das câmaras termográficas. Na análise estatística descritiva destes parâmetros foi também avaliado o comportamento da câmara climática com recurso aos parâmetros ambientais e superficiais, juntamente com uma comparação entre as câmaras termográficas. O resultado de algumas medidas descritivas: a média, desvio padrão, mínimo e máximo são apresentados no Quadro 12.

Na comparação da humidade relativa de referência com a ambiente verifica-se que a câmara climática não consegue atingir os valores de referência inferiores. A diferença entre o valor mínimo ambiente definido na câmara climática é de +4.8%, com a diferença registada de -0.7%. O mesmo se observa na temperatura de referência, onde os valores mais baixos não são atingidos em contraposição aos máximos.

As temperaturas refletidas encontram-se próximas da temperatura ambiente, com os valores médios, mínimos e máximos muito próximos. A temperatura média refletida captada pela câmara termográfica NEC é inferior à temperatura média ambiente enquanto a captada pela câmara termográfica Fluke é superior. Pode-se assim concluir que não existem efeitos relacionados com a reflexão e que a proteção da superfície metálica da câmara climática foi efetuada corretamente.

Na comparação das duas câmaras termográficas, verifica-se que a câmara Fluke apresenta valores ligeiramente superiores aos da câmara NEC, o que pode ser observado no Quadro 12 nos valores das temperaturas médias refletidas e nos máximos de cada uma das câmaras termográficas. Nas temperaturas máximas, i.e., os valores dos pontos mais quentes, a temperatura média apresenta uma diferença de +0.5°C entre a NEC e a Fluke. Os valores mínimos de ambas as câmaras são semelhantes, com a disparidade a registar-se nos valores máximos que apresentam uma diferença de +0.8°C.

Quadro 12 - Análise estatística descritiva dos parâmetros ambientais e superficiais das imagens captadas pelas câmaras termográficas e outros equipamentos

		Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
HR [%]	Referência	60.0	13.0	40.0	80.0
	Ambiente	63.1	9.7	44.8	79.3
Temperatura [°C]	Referência	20.0	6.4	10.0	30.0
	Ambiente	21.2	5.5	12.5	30.2
	Refletida NEC	20.7	5.5	11.8	29.6
	Refletida Fluke	21.9	5.4	13.2	30.9
	Máxima NEC	34.4	0.7	33.0	35.9
	Máxima Fluke	34.9	0.8	33.2	36.7

Na Figura 29 estão ilustradas as distribuições das temperaturas através de caixas de extremos e quartis (*boxplots*). Mais uma vez se verifica que as temperaturas de referência mais baixas nunca são atingidas pela câmara climática e que as temperaturas refletidas são muito próximas da temperatura ambiente em ambas as câmaras (Figura 29 a). Na Figura 29 b), verifica-se que embora as temperaturas máximas medianas, representada pela linha preta no interior dos *boxplot*, sejam muito semelhantes, no global os valores obtidos pela câmara termográfica NEC são mais homogêneos que os da Fluke, que se distribuem num intervalo de maior amplitude. Este intervalo é maior para temperaturas superiores como é constatado no Quadro 12.

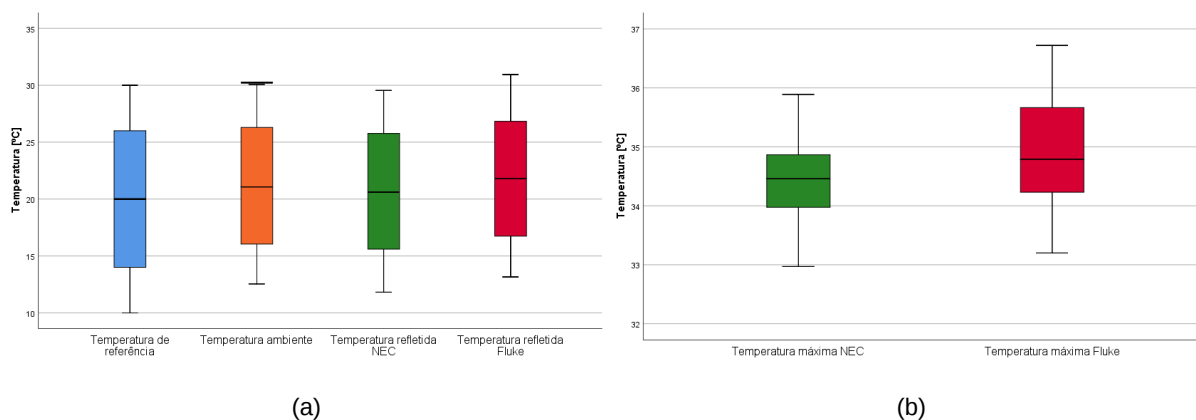


Figura 29 - *Boxplot* da temperatura medida: a) Refletida, ambiente, refletida da NEC e da Fluke; b) Máxima da NEC e Fluke

Na Figura 30 verifica-se que para valores de humidade relativa baixos, a câmara climática não os consegue atingir, comprovando a anterior análise aos resultados apresentados no Quadro 12, no qual se concluiu que a câmara climática não alcançava os valores de referência definidos.

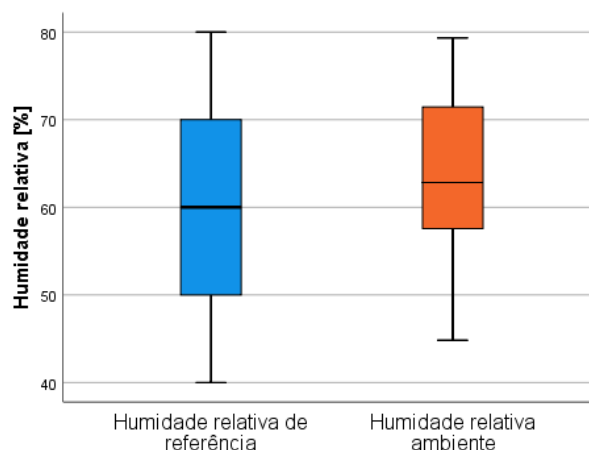


Figura 30 - Boxplot dos valores da humidade relativa

Na Figura 31 é ilustrada a distribuição da diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura refletida em cada uma das câmaras termográficas. Observam-se que os valores obtidos pela NEC são por excesso e os valores obtidos pela Fluke são por defeito. No entanto, esta diferença entre as duas temperaturas é pequena, como foi referido anteriormente neste subcapítulo, com todos os valores inferiores a $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (Quadro 7). Esta diferença absoluta inferior a 2°C encontra-se dentro do intervalo de precisão de cada uma das câmaras termográfica, podendo esta diferença estar relacionada com essa característica dos equipamentos.

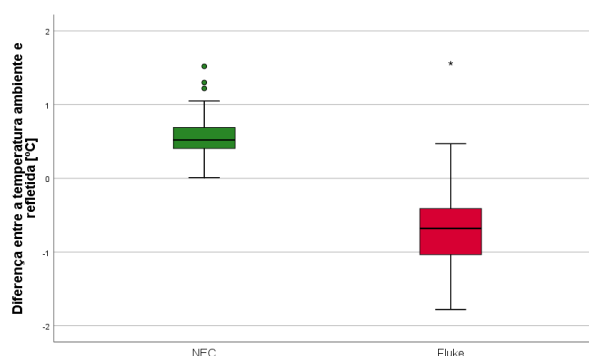


Figura 31 - Diferença entre a temperatura ambiente e relativa

Os ensaios realizados com os termómetros digitais com e sem contacto (Figura 10 b e c), apresentados no Quadro 13, mostram um crescimento da temperatura corporal que acompanha o aumento da temperatura de referência. O termómetro digital com contacto apresenta valores de temperatura superiores aos registados pelo termómetro digital sem contacto. Os valores obtidos para a mesma temperatura de referência com humidades relativas distintas apresentam valores muito semelhantes, podendo alguns estar associadas à precisão dos equipamentos apresentadas no Quadro 9.

Quadro 13 - Resultados dos ensaios realizados com os termómetros digitais com e sem contacto

Temperatura de referência [°C]	Termómetro com contacto [°C]			Termómetro sem contacto [°C]		
	Humidade relativa de referência [%]					
	40	60	80	40	60	80
10	36.5	37.1	36.9	32.2	32.6	32.6
12	36.7	36.9	37.0	33.6	33.0	33.0
14	36.9	36.9	36.9	34.0	33.6	33.4
16	36.8	36.9	37.0	34.7	34.1	34.6
18	36.8	37.2	37.2	34.6	34.4	35.2
20	36.8	37.1	37.1	35.6	35.5	35.6
22	37.1	37.1	37.1	35.7	35.6	35.6
24	37.1	37.2	37.0	35.8	35.6	35.7
26	37.2	37.2	37.2	36.0	36.0	36.1
28	37.1	37.4	37.0	36.3	36.6	36.3
30	37.1	37.2	37.1	36.6	36.6	36.7

Na Figura 32 são apresentadas as distribuições dos resultados obtidos nos ensaios referidos no Quadro 13, com recurso a *boxplots* para cada valor de humidade relativa de referência. Observam-se resultados muito semelhantes em cada equipamento para valores distintos de humidade relativa, em que não existe grande variação nem do intervalo de valores nem dos valores medianos. A temperatura do termómetro com contacto é em todos os ensaios superior à obtida no termómetro sem contacto e tem uma menor variação de valores, apresentando assim, valores muito homogêneos, ao contrário do que acontece com o termómetro sem contacto.

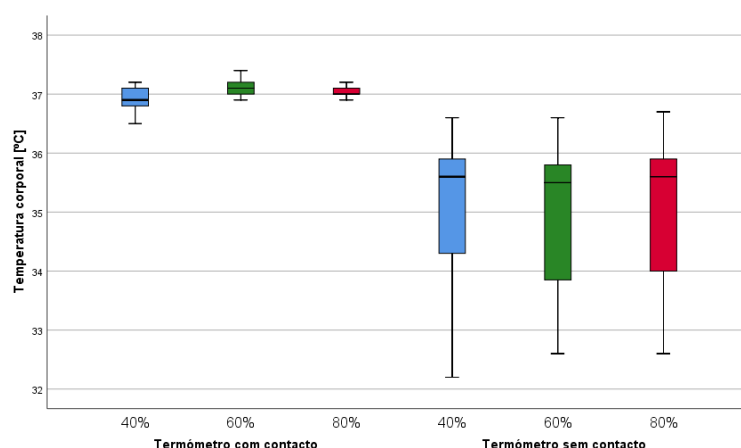


Figura 32 - *Boxplots* das temperaturas medidas com os termómetros digitais agrupadas por humidade relativa de referência

Como os ensaios efetuados com os termómetros digitais foram realizados para três valores de humidade relativa de referência (40%, 60% e 80%), a comparação com recurso a *boxplots*, apresentada na Figura 33, contém apenas os valores correspondentes aos ensaios realizados para os respetivos valores de

humidade relativa de referência. Observa-se que a temperatura do termómetro com contacto se encontra afastada dos valores máximos de cada uma das câmaras termográficas, não podendo existir uma ligação possível para efetuar uma comparação. Quanto ao termómetro sem contacto, a temperatura medida pelo equipamento encontra-se mais próxima dos valores das duas câmaras termográficas, em particular da Fluke.

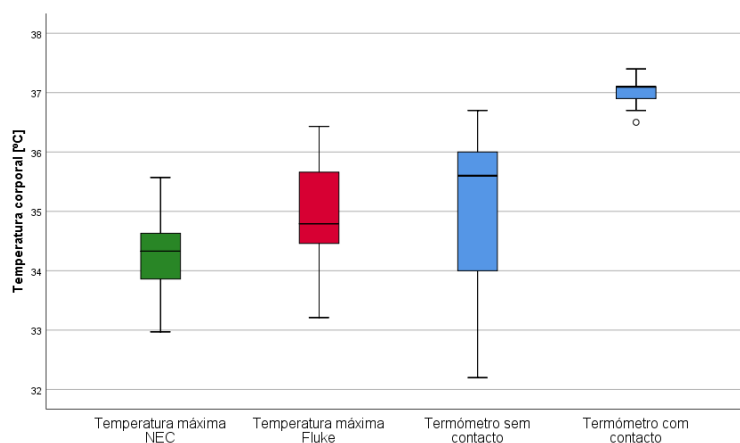


Figura 33 - Comparação das temperaturas máximas obtidas pelas câmaras termográficas com as temperaturas medidas pelos termómetros digitais

4.3.2. ANÁLISE DA LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MAIS QUENTES

No presente subcapítulo será apresentada a análise da localização dos pontos mais quentes com recurso ao *software* Autocad. Como referido no Capítulo 3, a temperatura de referência foi representada com cores frias e cores quentes e os resultados foram divididos por câmara termográfica e subdivididos por humidade relativa de referência (HR) apresentados na Figura 34.

De forma a agrupar as diferentes localizações de pontos mais quentes foram definidas quatro zonas da cara, agrupando as variações simétricas, como os dois cantos da boca. As zonas são as seguintes: a testa, os olhos, a boca e o queixo.

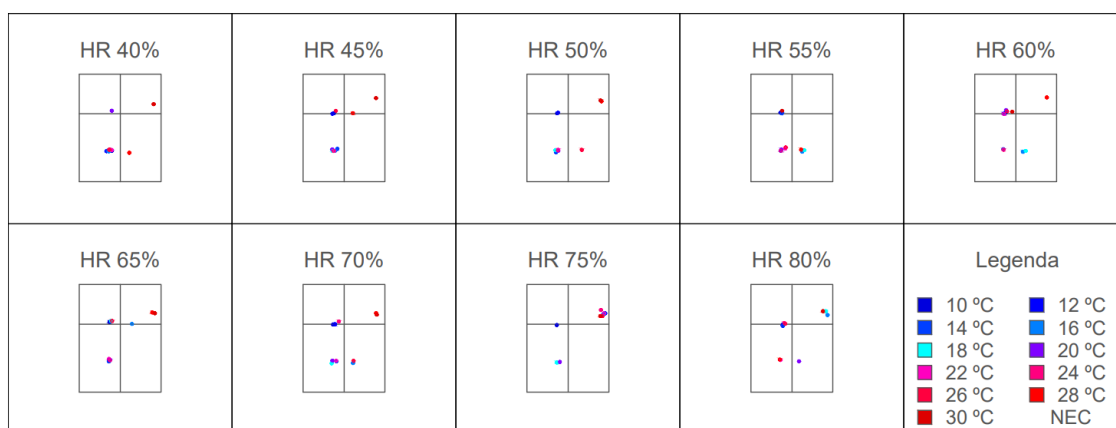
Verifica-se que na testa apenas existe uma posição onde os pontos mais quentes se localizam, que corresponde ao canto esquerdo da cara. Nos olhos as posições encontram-se no mesmo local, entre os cantos interior e exterior do olho. Enquanto isso, na boca, a posição é num canto. Tanto nos olhos como na boca as posições do ponto mais quente oscilam entre a direita e a esquerda. Estas localizações estão de acordo com o observado nas imagens térmicas apresentadas na análise qualitativa, onde essas eram as áreas mais quentes das zonas em questão. O queixo é referenciado como ponto mais quente em dois cenários, ambos obtidos na câmara termográfica Fluke, sendo a sua posição no centro do queixo. Na análise qualitativa verificou-se que, com o aumento da temperatura da câmara climática, aumenta também a temperatura do queixo, aproximando-se dos valores atingidos tanto na testa como nos olhos, que foram identificadas como zonas quentes do rosto. Estes dois pontos localizados no queixo correspondem a uma temperatura de referência de 30°C, estando de acordo com a temperatura observada na análise qualitativa.

Observando a Figura 34 a), pode-se constatar que os pontos mais quentes da câmara termográfica NEC se localizam na zona da boca, olhos e testa. Da Figura 34 b), pode-se observar que a localização dos pontos quentes na Fluke é semelhante, com a exceção de dois pontos mais quentes localizados no queixo.

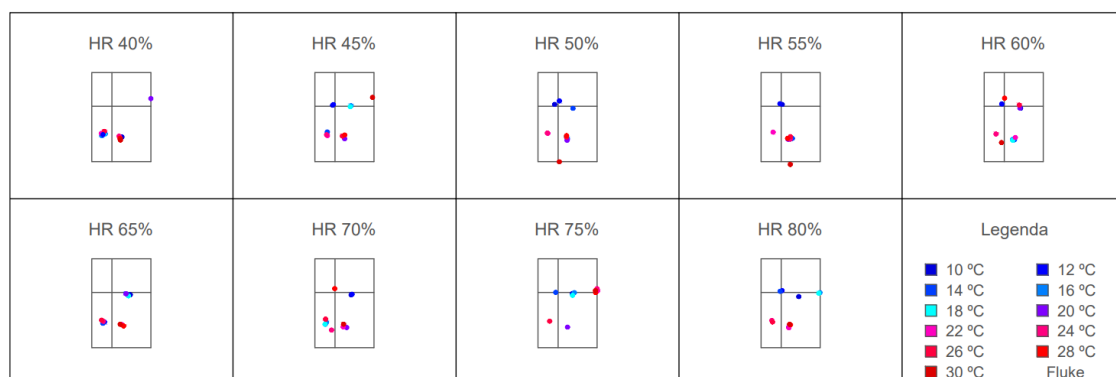
A localização dos pontos mais quentes em cada uma das câmaras não parece ter ligação com a temperatura de referência, i.e., não existe uma concentração dos pontos mais quentes em temperaturas elevadas (vermelhas) ou temperaturas baixas (azuis) num local específico.

Em valores de humidade relativa de referência mais baixos, a localização dos pontos mais quentes em ambas câmaras termográficas está tendencialmente circunscrita à boca, sendo que em valores mais elevados, observa-se uma tendência à localização ser numa zona superior da cara, ou seja, os olhos ou a testa. No entanto, esta transposição não está associada às temperaturas de referência, pois não se identifica um padrão entre a localização e as cores. O caso particular da HR 75%, em que os pontos quentes em ambas as câmaras termográficas se localizam maioritariamente na testa, não está associada a nenhuma alteração de procedimento, nem dos parâmetros ambientais, pelo que se pode colocar a hipótese de a causa ser do foro fisiológico.

Conclui-se então que, da observação da localização dos pontos mais quentes de cada câmara termográficas, não é evidenciado nenhum padrão em relação à temperatura e humidade relativa de referência, nas câmaras termográficas NEC e Fluke.



(a)



(b)

Figura 34 - Localização dos pontos mais quentes na câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke

4.3.3. ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES

As relações entre os parâmetros ambientais e superficiais estão ilustradas na Figura 35 e os respectivos coeficientes de correlação são apresentadas no Quadro 14, de forma a identificar a existência de relações lineares entre os diversos parâmetros. Durante este subcapítulo foi adotado um conjunto de siglas para se referir aos diferentes parâmetros com maior facilidade. As siglas são as seguintes:

- Ta - Temperatura ambiente;
- HRa. - Humidade relativa ambiente;
- TmN - Temperatura máxima da câmara termográfica NEC;
- TmF - Temperatura máxima da câmara termográfica Fluke;
- TrN - Temperatura refletida da câmara termográfica NEC;
- TrF - Temperatura refletida da câmara termográfica Fluke.

No Quadro 14, é apresentada a matriz de correlações é, em que os valores da matriz são apresentados na forma R-(Valor-p), em que R é o coeficiente de correlação entre as variáveis e o valor-p é a significância estatística do teste. Neste teste a hipótese H_0 é que não existe correlação entre as variáveis ($R=0$), sendo a decisão tomada da seguinte forma:

Se Valor-p > 5 %, então as variáveis não estão correlacionadas, $R=0$ (aceita-se H_0), caso contrário rejeita-se H_0 , ou seja, as variáveis são linearmente correlacionadas, $R \neq 0$.

Assim, verificou-se que a HRa não é correlacionada com nenhuma das restantes variáveis. Este resultado está em concordância com a análise dos *boxplots* dos ensaios com termómetros, apresentados na Figura 32, no qual não se verificaram alterações significativas de valores em HRa distintas. Concluiu-se que a HRa não tem influência sobre os resultados da temperatura do rosto.

As restantes variáveis demonstram ser correlacionadas entre si, com a Ta demonstrar ter influência nos valores obtidos através das câmaras termográficas. Existe uma relação linear bastante forte entre as variáveis Ta, TrN e TrF, estando de acordo com a análise gráfica dos *boxplots* das três variáveis, que se encontram com os intervalos semelhantes (Figura 29 a). Confirma-se novamente a não existência de problemas associados com a reflexão.

Relacionando as temperaturas máximas obtidas pelas câmaras termográficas com a Ta, obtiveram-se coeficientes de correlação linear mais baixos relativamente aos pares de variáveis (Ta,TrN), (Ta, TrF) ou (TrN,TrF). No entanto, também existe uma relação linear forte entre as variáveis Ta, TmN e TmF. Estes valores podem ser explicados por observação da Figura 29 b), sendo que os valores máximos atingidos pela Fluke não são atingidos pela câmara termográfica NEC. Apresentam um intervalo de temperatura máxima superior e uma diferença de +0.5°C entre a média dos valores medidos das câmaras termográficas, como referido anteriormente na análise do Quadro 12.

Quadro 14 - Matriz de correlação

	Ta	HRa	TmN	TmF	TrN	TrF
Ta	1.000	0.110 (0.277)	0.908 (0.000)	0.918 (0.000)	0.996 (0.000)	0.994 (0.000)
HRa		1.000	0.153 (0.131)	-0.065 (0.520)	0.142 (0.162)	0.135 (0.183)
TmN			1.000	0.865 (0.000)	0.912 (0.000)	0.902 (0.000)
TmF				1.000	0.915 (0.000)	0.908 (0.000)
TrN					1.000	0.995 (0.000)
TrF						1.000

As nuvens de pontos representadas na Figura 35 ilustram as relações lineares entre as variáveis Ta, TrN, TrF, TmN e TmF. Confirmam-se as relações lineares quase perfeitas entre Ta, TrN e TrF, e também são evidentes as relações lineares fortes entre as outras variáveis. É também evidenciada graficamente a inexistente relação entre a HRa e as outras variáveis relativas à temperatura.

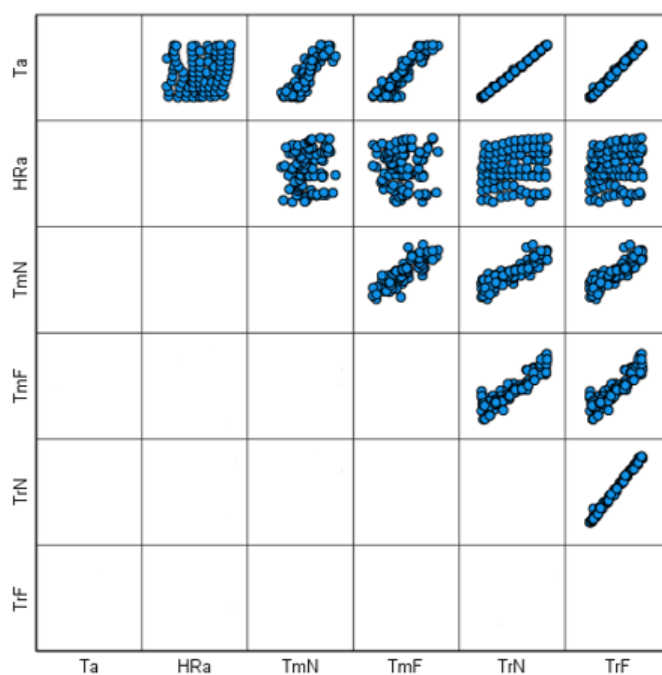


Figura 35 – Nuvens de pontos

4.3.4. REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Com o intuito de modelar as temperaturas máximas obtidas pelas câmaras termográficas em função dos parâmetros ambientais, no presente subcapítulo serão apresentados os modelos de regressão linear múltipla obtidos para cada câmara termográfica.

A regressão linear múltipla foi efetuada inicialmente com todos os parâmetros (variáveis), considerando-se como variável dependente a temperatura máxima da respetiva câmara termográfica e como variáveis independentes a temperatura e humidade relativa ambiente e a temperatura refletida da respetiva câmara termográfica. Usando o nível de significância de 5%, as variáveis independentes foram excluídas do modelo de acordo com a aplicação de um teste de hipóteses para avaliar a sua significância. Assim, se valor-p for inferior a 5 %, o coeficiente da variável no modelo é significativamente diferente de zero, pelo que a variável será considerada no modelo; caso contrário a variável não tem influência no valor da temperatura máxima, pelo que é excluída. A qualidade do ajuste de um modelo será realizada através do coeficiente R^2 , quanto mais próximo de 1, melhor será o modelo.

De acordo com o diagnóstico de colineariedade efetuado, pelo facto de existir uma correlação forte entre a temperatura máxima e a temperatura refletida, no primeiro passo esta variável foi excluída do modelo, mantendo-se apenas os parâmetros ambientais. No segundo passo, verificou-se que tanto a humidade relativa como a temperatura ambiente têm influência na temperatura máxima da câmara termográfica Fluke. No entanto, relativamente à câmara termográfica NEC, apenas a variável temperatura ambiente se revelou ser estatisticamente significativa, como variável independente.

Os resultados do melhor modelo de regressão linear encontrado para a câmara termográfica NEC são apresentados no Quadro 15 e para a câmara termográfica Fluke estão apresentados no Quadro 16. De referir que, no modelo relativo à Fluke, a humidade relativa ambiente apresenta uma influência inferior à temperatura ambiente, como era expectável.

Quadro 15 - Modelo de regressão linear a câmara termográfica NEC

Modelo	Coeficiente	valor-p	R^2
Constante	32.190	0.000	0.785
Temperatura ambiente	0.105	0.000	

Quadro 16 - Modelo regressão linear para a câmara termográfica Fluke

Modelo	Coeficiente	valor-p	R^2
Constante	32.676	0.000	0.865
Temperatura Ambiente	0.141	0.000	
HR Ambiente	-0.013	0.000	

Com os valores apresentados no Quadro 15 e no Quadro 16 tem-se o modelo que melhor descreve a relação da T_m com a T_a e a HRa para a câmara termográfica NEC, descrito na equação (8) e o modelo que melhor descreve a relação da T_m com a T_a e a HRa para a câmara termográfica Fluke, descrito na equação (9).

$$T_{mN} = 32.190 + 0.105 \cdot T_a \quad (8)$$

$$T_{mF} = 32.676 + 0.141 \cdot T_a - 0.013 \cdot HRa \quad (9)$$

Em que:

- T_{mN} - Temperatura máxima da câmara termográfica NEC [°C];
- T_{mF} - Temperatura máxima da câmara termográfica Fluke [°C];
- T_a - Temperatura ambiente [°C];
- HRa - Humidade relativa ambiente [%].

As estimativas da temperatura máxima, utilizando os modelos apresentados nas equações (8) e (9) e as temperaturas máximas observadas estão representadas graficamente na Figura 36 e na Figura 37, para a câmara termográfica NEC e Fluke, respetivamente.

Na Figura 36 observa-se que o modelo linear para a câmara termográfica NEC é uma linha reta em que os valores da temperatura máxima estão mais dispersos nas temperaturas inferiores e superiores, com o intervalo de 18°C a 24°C a ser o mais próximo dos valores estimados.

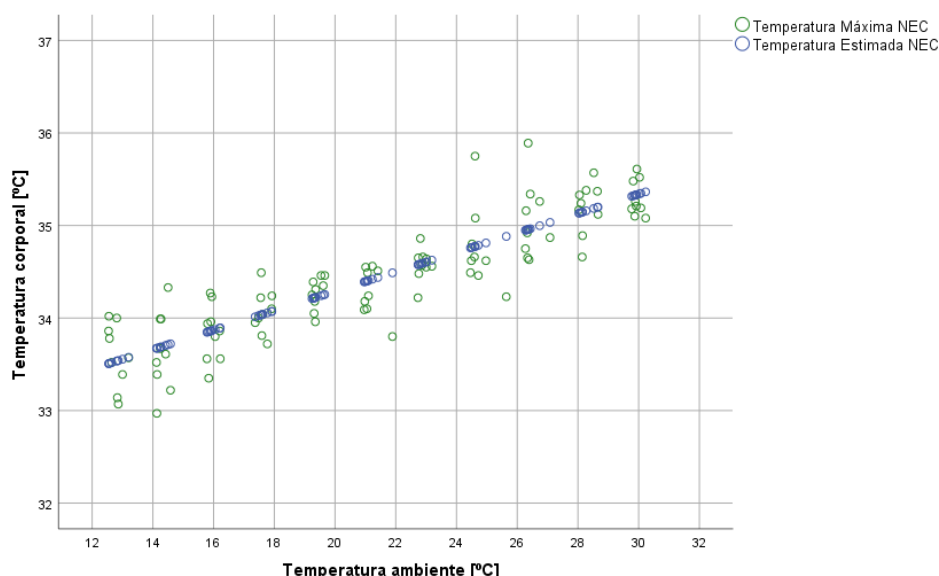


Figura 36 - Comparação da temperatura máxima estimada e observada para a câmara termográfica NEC

Na Figura 37 observa-se os resultados do modelo ajustado para a câmara termográfica Fluke, com duas variáveis independentes, T_a e HR_a , resultando numa maior dispersão dos valores estimados.

Nas temperaturas mais baixas, a temperatura máxima apresenta uma maior variação dos seus valores. Contudo, este modelo apresenta uma maior aproximação entre os valores estimados e observados, evidenciado pelo valor de R^2 de 86.5 % (Quadro 16), sendo este superior ao do modelo da câmara termográfica NEC ($R^2=78.5$ %) (Quadro 15).

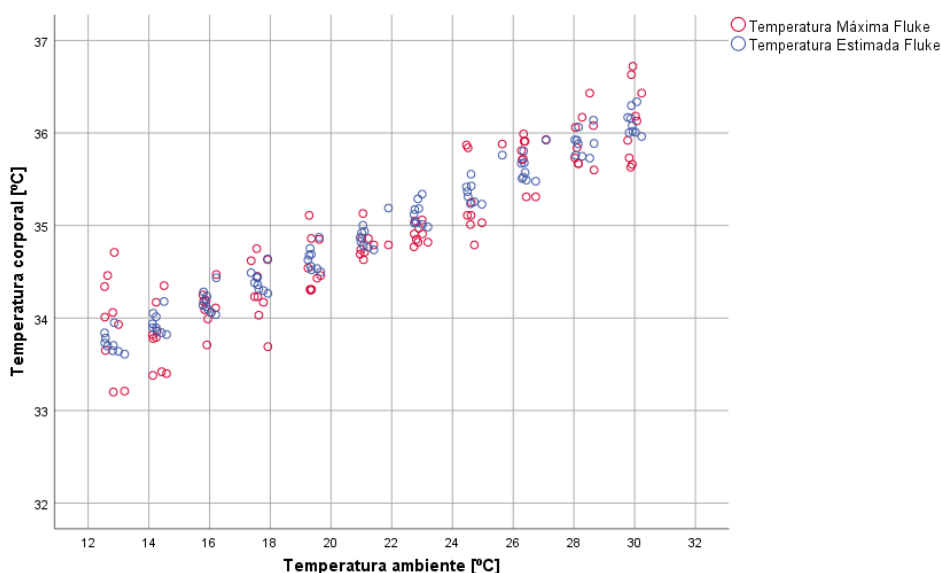


Figura 37 - Comparação da temperatura máxima estimada e observada para a câmara termográfica Fluke

4.3.5. ANÁLISE GRÁFICA COMPARATIVA DOS EQUIPAMENTOS

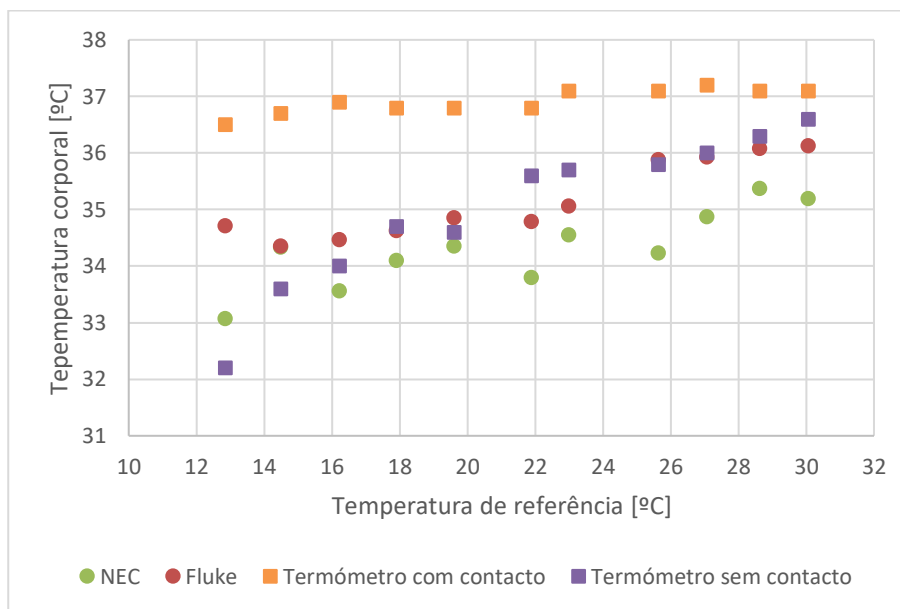
No presente subcapítulo serão apresentadas ilustrações gráficas que evidenciam a temperatura máxima de cada câmara termográfica como função da temperatura e humidade relativa de referência, de acordo com os vários cenários utilizados, para a comparação dos equipamentos.

Na Figura 38 estão representados os resultados da temperatura máxima obtidos por cada câmara termográfica e da temperatura medida pelos termómetros digitais, para três valores de humidade relativa. Estes valores foram obtidos aquando dos ensaios para os valores de humidade relativa de referência (Quadro 13), correspondendo ao valor mínimo, médio e máximo do intervalo de valores de humidade relativa estudado na presente dissertação.

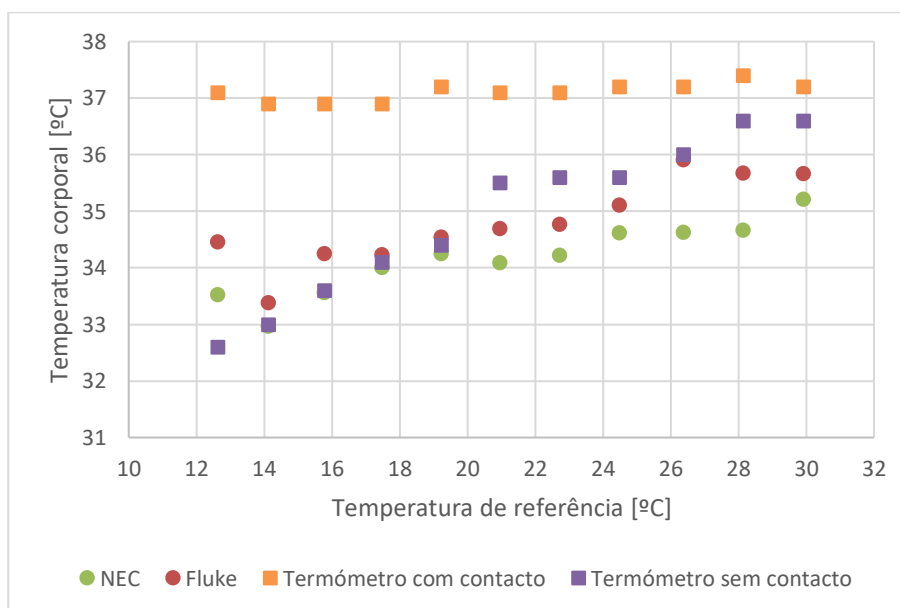
Na Figura 38 observa-se que as temperaturas medidas pelo termómetro com contacto se mantêm constantes durante os ensaios, com uma variação de valores muito reduzida e valores superiores em relação aos obtidos pelas câmaras termográficas. Estes valores são superiores aos medidos no ensaio preliminar, apresentados na Figura 11, pelo que poderá ser a influência do uso contínuo da máscara. Como os valores não se alteram consoante a variação da temperatura de referência, não serão úteis para o estudo da temperatura do rosto. Os valores medidos pelo termómetro sem contacto encontram-se mais próximos das temperaturas máximas da NEC e Fluke, acompanhando a sua evolução de temperatura. Existe uma maior proximidade de valores deste equipamento com a câmara termográfica Fluke, estando de acordo com a representação gráfica na Figura 33, apresentado anteriormente neste capítulo.

Os valores das temperaturas máximas NEC e Fluke são crescentes e apresentam valores próximos em temperaturas baixas e valores mais afastados em temperaturas elevadas, estando de acordo com o representado anteriormente neste capítulo na Figura 29 b).

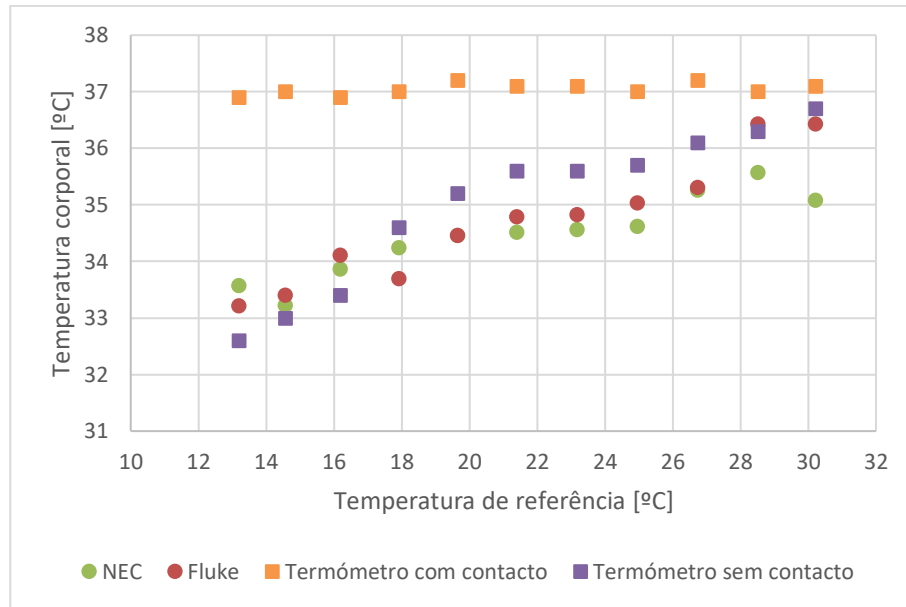
Na Figura 38, constata-se que a variação de humidade relativa não produziu variações significativas na temperatura, o que era esperado devido à sua não influência na câmara termográfica NEC (Quadro 15) e à sua reduzida influência na câmara termográfica Fluke (Quadro 16), como referido anteriormente neste capítulo.



(a)



(b)



(c)

Figura 38 - Evolução da temperatura medida pelos termómetros digitais e temperatura máxima obtida pelas câmaras termográficas na humidade relativa de referência de: a) 40%; b) 60%; c) 80%

Na Figura 39 estão apresentados os valores máximos obtidos de cada cenário, de cada câmara termográfica, ordenados por temperatura de referência. Verifica-se o crescimento da temperatura do rosto à medida que aumenta a temperatura da câmara climática, com maior amplitude de variação em temperaturas baixas, sendo os valores entre câmaras muito semelhantes. Nas temperaturas mais elevadas a câmara termográfica Fluke apresenta valores superiores comparativamente à NEC, como constatado no Quadro 12.

O crescimento da temperatura do rosto em relação a este parâmetro ambiental está de acordo com o estudo da sua influência nas câmaras termográficas NEC (Quadro 15) e Fluke (Quadro 16).

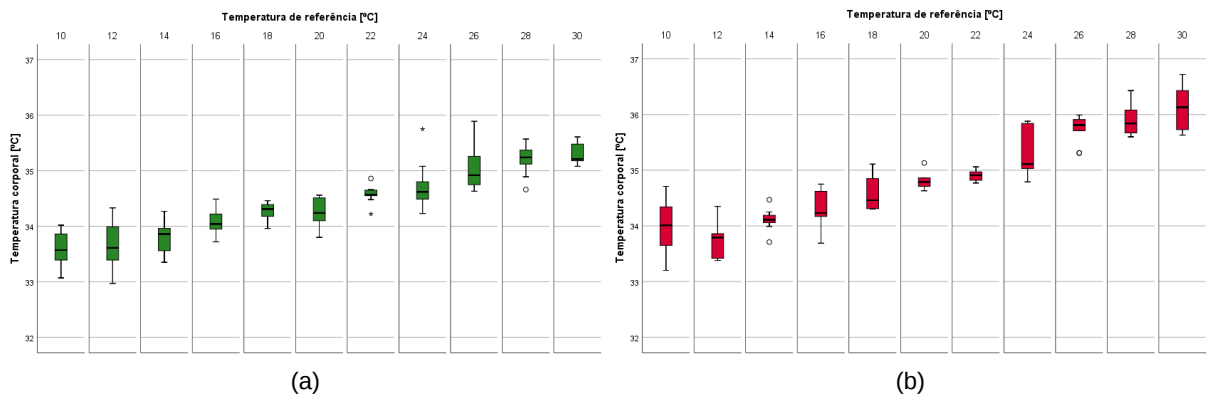


Figura 39 - Boxplots da temperatura máxima em função da temperatura de referência da câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke

Na Figura 40 estão apresentados os valores máximos obtidos de cada cenário, de cada câmara termográfica, ordenados por humidade relativa de referência. Observa-se um conjunto de valores muito próximos em ambas as câmaras termográficas, com o valor mediano dos cenários para diferentes humidades relativas a ter uma variação bastante reduzida. Na Figura 40 b), os valores da Fluke apresentam uma maior variação em relação aos apresentados pela NEC. Estes resultados estão de acordo com as conclusões anteriores neste capítulo, em que se observou valores mais elevados da temperatura máxima da Fluke em relação à temperatura máxima NEC e a reduzida ou nula influência da humidade relativa.

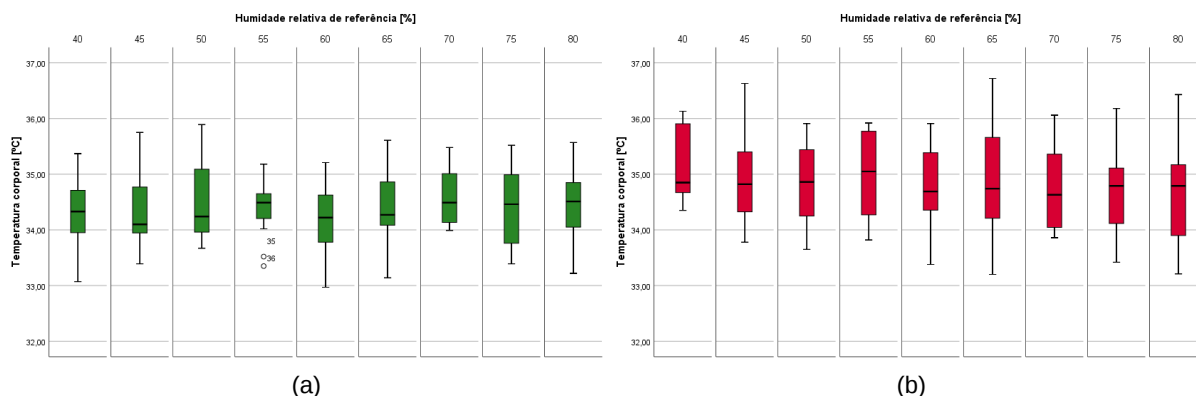


Figura 40 - Boxplots da temperatura máxima em função da humidade relativa de referência da câmara termográfica: a) NEC; b) Fluke

4.3.6. ANÁLISE DA ASSOCIAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MAIS QUENTES DAS CÂMARAS TERMOGRÁFICAS NEC E FLUKE

No presente subcapítulo será apresentada a análise da associação da localização dos pontos mais quentes das câmaras termográficas NEC e Fluke, realizados no SPSS.

De forma a avaliar a associação da localização dos pontos mais quentes utilizou-se um teste Qui-quadrado, onde foi colocada a hipótese que não existir associação entre a localização dos pontos mais quentes de ambas câmaras termográficas (H_0 : Não existe associação).

Neste teste estatístico, o nível de significância estatística, fixado em $\alpha=5\%$, expressa o risco de concluir que existe associação entre as variáveis quando não existe uma associação real. Os possíveis resultados do teste e os seus significados são os seguintes:

- Valor- $p \leq \alpha$: As variáveis apresentam uma associação estatisticamente significativa, deve ser rejeitado H_0 ;
- Valor- $p > \alpha$: Não é possível concluir que as variáveis estão associadas, não deve ser rejeitado H_0 .

O resultado do teste Qui-quadrado foi 53.332 (0.000) (com valor- $p = 0.000$). Como o valor- p é inferior ao nível de significância, a hipótese de não existir associação entre variáveis (H_0) foi rejeitada, ou seja, existe associação entre as localizações dos pontos mais quentes das câmaras termográficas NEC e Fluke.

A ilustração gráfica da associação entre as duas câmaras termográficas está apresentada na Figura 41. O eixo das abcissas representa as localizações dos pontos mais quentes da câmara termográfica NEC e o eixo das ordenadas representa as localizações dos pontos mais quentes da câmara termográfica Fluke.

Os rótulos correspondem ao número absoluto de ocorrências. Na diagonal, exibida a laranja, estão representados os casos com a mesma localização em ambas as câmaras termográficas no mesmo cenário.

A boca é a zona do rosto com maior correspondência entre as duas câmaras, seguida dos olhos e, por fim, a testa. As localizações correspondentes entre as câmaras termográficas NEC e Fluke correspondem a 69 cenários, restando apenas 30 cenários nos quais a correspondência não foi comum.

A boca é a zona do rosto que mais frequentemente apresenta localizações do ponto mais quente, em ambas as câmaras termográficas, algo que pode também ser verificado na Figura 34.

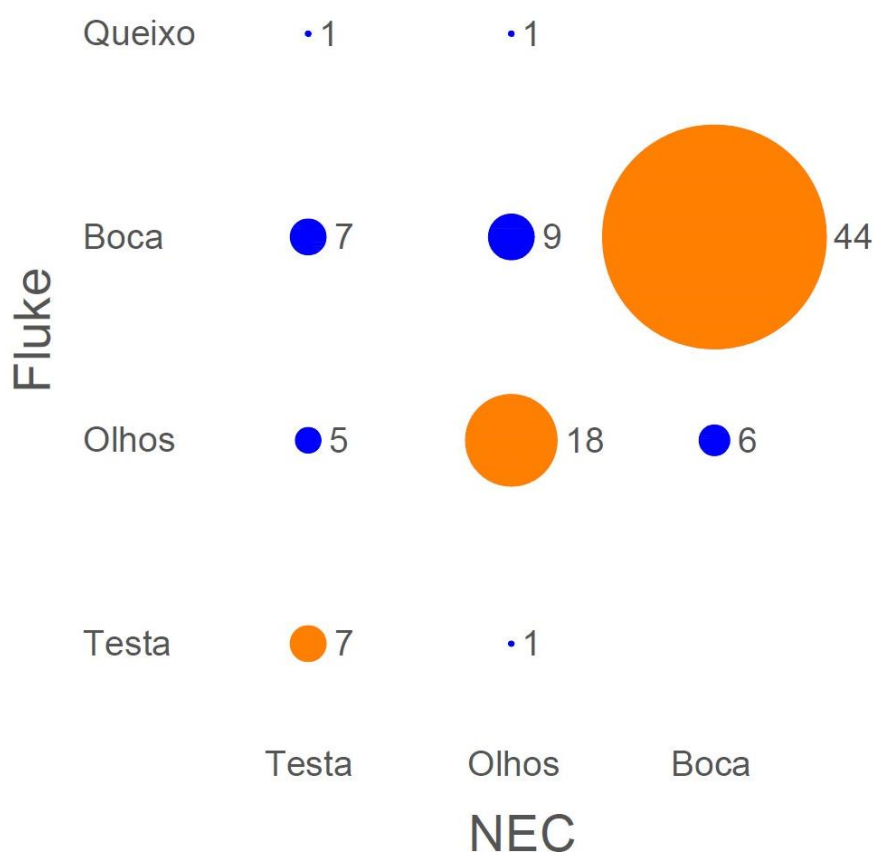


Figura 41 - Associação das localizações dos pontos mais quentes nas câmaras termográficas NEC e Fluke

5

AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

5.1. OBJETIVOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da avaliação do conforto térmico a partir das imagens térmicas. Para esse efeito são definidas caixas para analisar as temperaturas nas diferentes zonas do rosto e comparar com os valores calculados do PMV. No final é estabelecida uma relação entre as temperaturas médias das caixas e os valores do PMV, perspetivando o possível uso da termografia de infravermelhos na avaliação do conforto térmico.

5.2. AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DO ROSTO POR ÁREAS

No presente subcapítulo são expostos e analisados os valores obtidos pela divisão do rosto em zonas, com o recurso a caixas com distintas formas geométricas, como pode ser observado na Figura 21. Como referido no Capítulo 3, esta análise foi efetuada apenas com a câmara termográfica NEC, devido à sua posição mais frontal e enquadrada (Figura 13).

Na Figura 42 são apresentados três gráficos com os valores médios da temperatura do rosto obtidos a partir das caixas nas diferentes zonas do rosto em três valores distintos de humidade relativa de referência. Os valores escolhidos foram 40%, 60% e 80%, sendo equivalentes ao valor mínimo, média e máximo do intervalo estudado respetivamente. O parâmetro referido como “Cara” nos gráficos da Figura 42, representado com um marcador quadrado azul, corresponde ao valor médio da temperatura considerando toda o rosto.

Verifica-se, como seria expectável, um crescimento dos valores da temperatura do rosto em todas as zonas específicas do rosto em função do aumento da temperatura ambiente da câmara climática. Esta evolução da temperatura é semelhante à registada nos pontos mais quentes em ambas as câmaras termográficas, representada na Figura 38.

Nos valores de temperatura ambiente inferiores, os valores das zonas específicas do rosto exibem uma maior heterogeneidade com o nariz como zona mais fria e apresentando valores claramente discrepantes face às restantes zonas do rosto. As bochechas exibem uma temperatura mais próxima das restantes zonas do rosto, mostrando-se afastadas dos valores do nariz. Os valores mais baixos da temperatura no nariz eram expectáveis de acordo com outros estudos realizados por outros autores. No entanto a bochecha, embora apresente valores mais baixos em relação às restantes zonas da cara, era expectável que tivesse valores mais próximos aos atingidos no nariz, segundo trabalhos realizados por outros autores [20]. Os valores mais elevados da bochecha podem resultar do uso de máscara, já referido

anteriormente no Capítulo 4, ou da caixa utilizada não abranger totalmente as zonas mais frias da bochecha (Figura 21 c, d). As zonas do rosto com a temperatura mais elevada são o queixo e testa. O queixo apresenta valores ligeiramente superiores aos da testa, podendo esta diferença resultar, mais uma vez, da utilização da máscara como referido anteriormente no Capítulo 4. Para além disso, o facto de a caixa da testa não abranger os extremos laterais, direito e esquerdo, pode ter igualmente contribuído para estes resultados, uma vez que se verificou na análise qualitativa que correspondem às localizações dos pontos mais quentes na testa. A diferença de temperatura entre o queixo e testa é distinta da encontrada em trabalhos realizados por outros autores [19] [20], efetuando uma análise qualitativa das imagens dos mesmos. Relativamente à análise qualitativa, efetuada no Capítulo 3, confirma-se a heterogeneidade das temperaturas do rosto, bem como a identificação das zonas frias e quentes, com a exceção do queixo.

Nos valores de temperatura ambiente intermédios, a dispersão entre os valores das zonas torna-se menos acentuada. O nariz continua a apresentar valores mais baixos, estando de acordo com o observado na análise qualitativa da Figura 24.

Nos valores de temperatura ambiente superiores, existe um evidente aproximar das temperaturas das zonas específicas do rosto. Esta homogeneização está de acordo com a análise qualitativa das imagens térmicas, presente no Capítulo 4. Nessa análise foi referido que a aproximação dos valores aparentava situar-se entre as temperaturas de referência de 24°C a 26°C. Em comparação com a Figura 42, verifica-se que, apenas a partir da temperatura de 26°C, se observa uma homogeneidade dos valores específicas do rosto. As zonas do rosto identificadas como frias, o nariz e as bochechas, que nas temperaturas ambiente inferiores apresentam valores baixos em relação à média da cara, exibem agora valores semelhantes às restantes zonas do rosto e, conseqüentemente, ao valor médio do rosto. Estes valores não eram totalmente esperados de acordo com outros trabalhos [20], e novamente, o uso contínuo de máscara facial entre os ensaios pode ajudar a explicar a diferença.

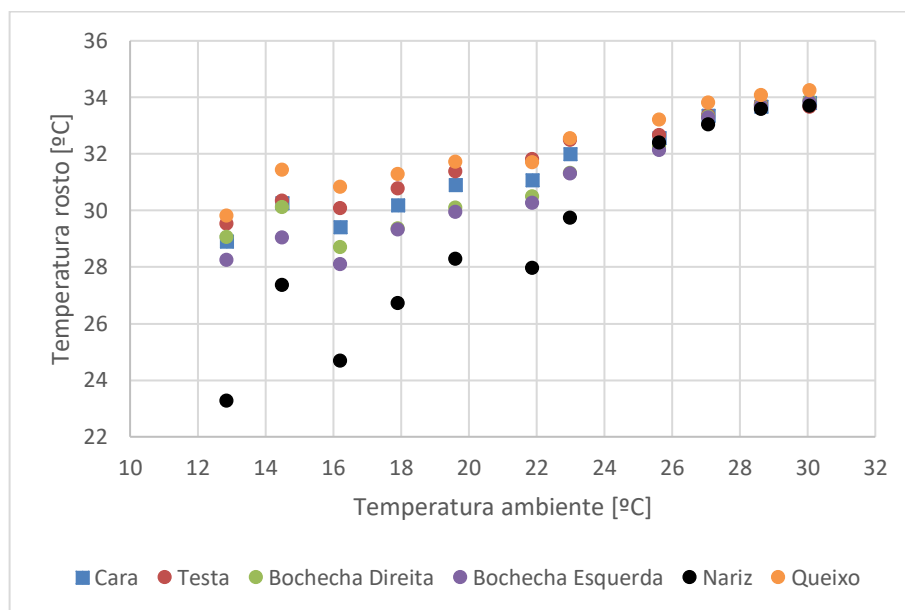
Os valores do nariz durante as temperaturas ambiente inferiores apresentam valores dispersos e por vezes uma tendência contrária às restantes zonas do rosto, como apresentado na Figura 42 c). Esta variação de temperatura pode ser explicada com o já referido uso de máscara, mas também com a caixa utilizada na determinação dos valores (Figura 21 b). Na análise qualitativa, identificou-se como zonas mais quentes o canto interior e exterior do olho, algo que foi comprovado na análise das localizações dos pontos mais quentes, apresentados na Figura 34. Existe assim a possibilidade de alguns valores da caixa referente ao nariz ter abrangido zonas onde se verificou essa temperatura mais elevada, explicando desta forma alguns valores atípicos nos gráficos expostos.

Nota também para as bochechas que apresentam valores semelhantes durante todas as temperaturas ambiente, com as pequenas diferenças de temperatura poderem estar associadas à posição da sua caixa no rosto (Figura 21 c, d).

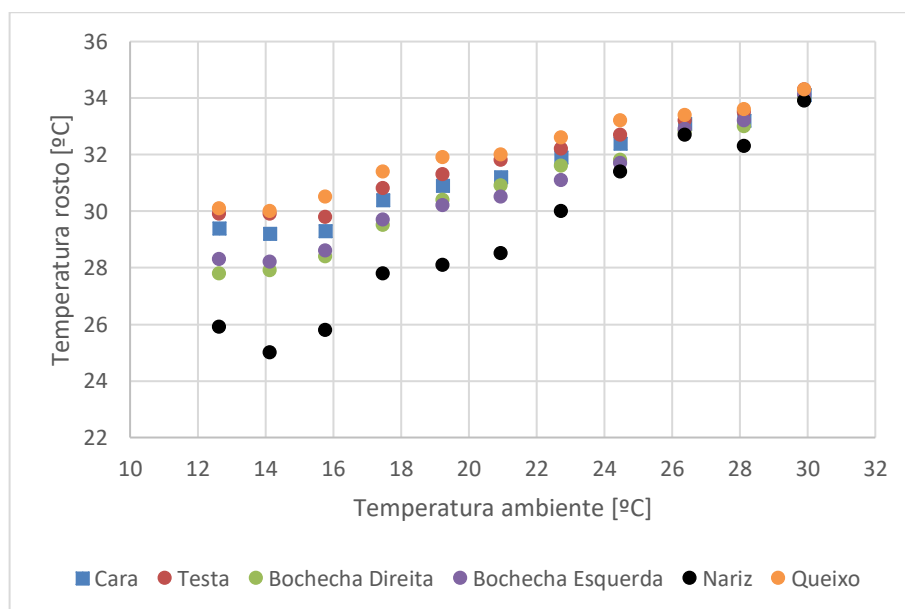
A menor variação da temperatura da testa e das bochechas e a maior variação da temperatura no nariz, encontra-se de acordo com a informação obtida noutros trabalhos realizados [18].

Na Figura 42 existem algumas exceções à evolução crescente da temperatura do rosto, podendo estar relacionadas com uma possível duração superior do procedimento de ensaios ou pela própria precisão dos equipamentos (Quadro 7), uma vez que não foram detetados outros fatores que pudessem ter influenciado os resultados obtidos. A hipótese de estar relacionada com a escolha de uma das cinco imagens térmicas, devido a serem captadas de 30 em 30 segundos, não é considerada devido a se ter verificado que não existiam diferenças consideráveis na temperatura durante o período de 2 minutos e 30 segundos do ensaio.

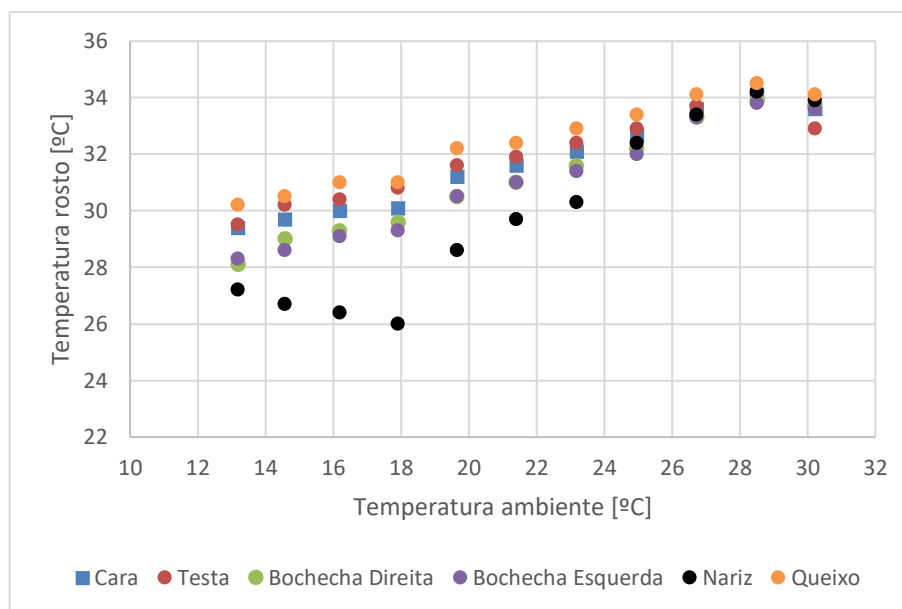
Os valores de temperatura do nariz e das bochechas, apresentados na Figura 42, exibem uma maior variação, comparativamente às restantes zonas do rosto. Segundo Li et al [20], no aquecimento, o nariz, as bochechas e as orelhas são as áreas que apresentam maior variação de temperatura, estando em linha com os resultados obtidos.



(a)



(b)



(c)

Figura 42 - Evolução da temperatura das zonas do rosto para a humidade relativa de referência de: a) 40%; b) 60%; c) 80%

No Capítulo 3, na análise das localizações dos pontos mais quentes, verificou-se que, nos ensaios realizados nos cenários correspondentes à humidade relativa de referência de 75%, se encontravam situados na testa. Esta situação, representada na Figura 34, ocorreu em ambas as câmaras termográficas, tendo sido referido que poderia ser algo do foro fisiológico que tivesse causado as localizações anómalas.

Na Figura 43 estão apresentadas as temperaturas do rosto correspondentes ao cenário com humidade relativa de referência de 75%. Em relação aos gráficos apresentados na Figura 42, verifica-se uma aproximação dos valores nas temperaturas ambiente inferiores e intermédias que não sucedia anteriormente. No primeiro cenário, o nariz apresenta um valor de temperatura superior ao das bochechas e próximo das zonas com temperatura mais elevada do rosto. De forma a garantir que este resultado não era proveniente de um erro no procedimento efetuou-se uma medição da temperatura no nariz nas restantes imagens térmicas do cenário, no qual se obtiveram valores semelhantes. As bochechas apresentam valores de temperatura próximos da testa durante todos os cenários, o que não sucedeu nos cenários expostos na Figura 42.

Tendo em conta os resultados anómalos das várias temperaturas do rosto e a localização dos pontos mais quentes, pode-se concluir que a hipótese de ser resultado de algo do foro fisiológico é viável.

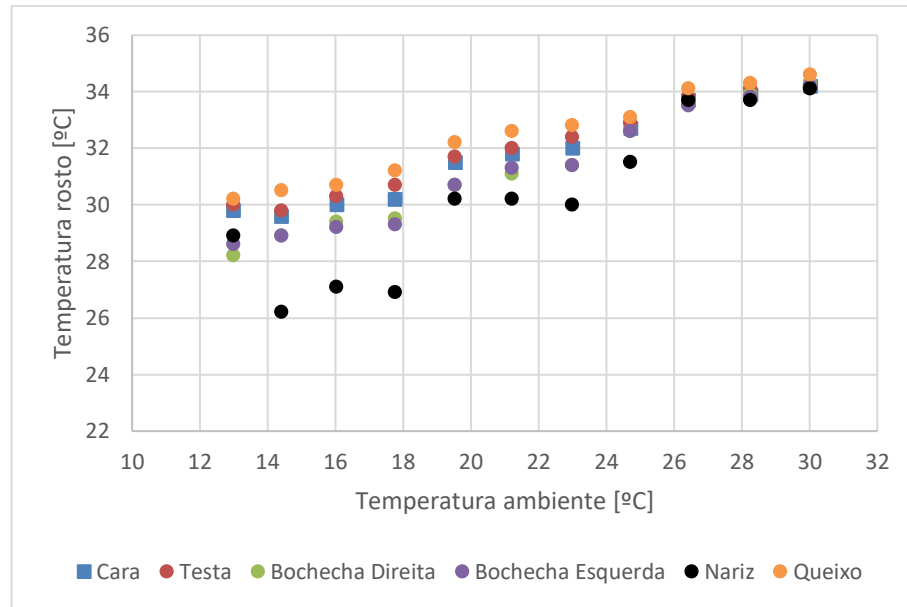


Figura 43 - Evolução da temperatura das zonas do rosto para a humidade relativa de referência de 75%

No gráfico *boxplot* apresentado na Figura 44, estão representados os valores das zonas específicas do rosto equivalentes ao mínimo (nariz) e ao máximo (queixo) e a média dos valores do rosto (cara), ordenados por temperatura de referência. A heterogeneidade nas temperaturas ambiente inferiores e uma maior homogeneidade nas temperaturas ambiente superiores, torna-se evidente nesta representação.

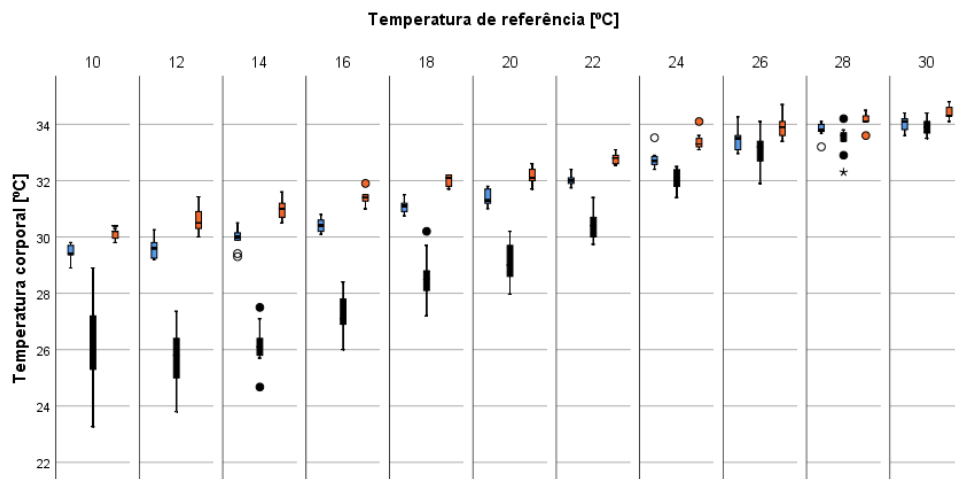


Figura 44 - *Boxplots* das temperaturas das caixas correspondentes à cara (azul), ao nariz (preto) e ao queixo (laranja), agregados por temperatura de referência

5.3. AVALIAÇÃO DO PMV

No presente subcapítulo, são expostos os resultados da determinação do PMV segundo a norma ISO 7730, descrita no Capítulo 3, e a sua relação com os resultados de temperatura das diferentes zonas do rosto. O vestuário utilizado durante os ensaios adaptou-se aos valores da temperatura de referência, estando os valores utilizados expostos no Quadro 11. Considerou-se ainda que no interior da câmara climática a velocidade do ar é negligenciável e que a temperatura radiante pode ser aproximada pela temperatura do ar.

Na Figura 45 estão representados os valores obtidos do PMV e repetitivo PPD. Verifica-se que com as condições impostas na câmara climática conseguiu-se abranger um intervalo de valores bastante significativo, compreendendo quase todo o intervalo do PMV (Quadro 5).

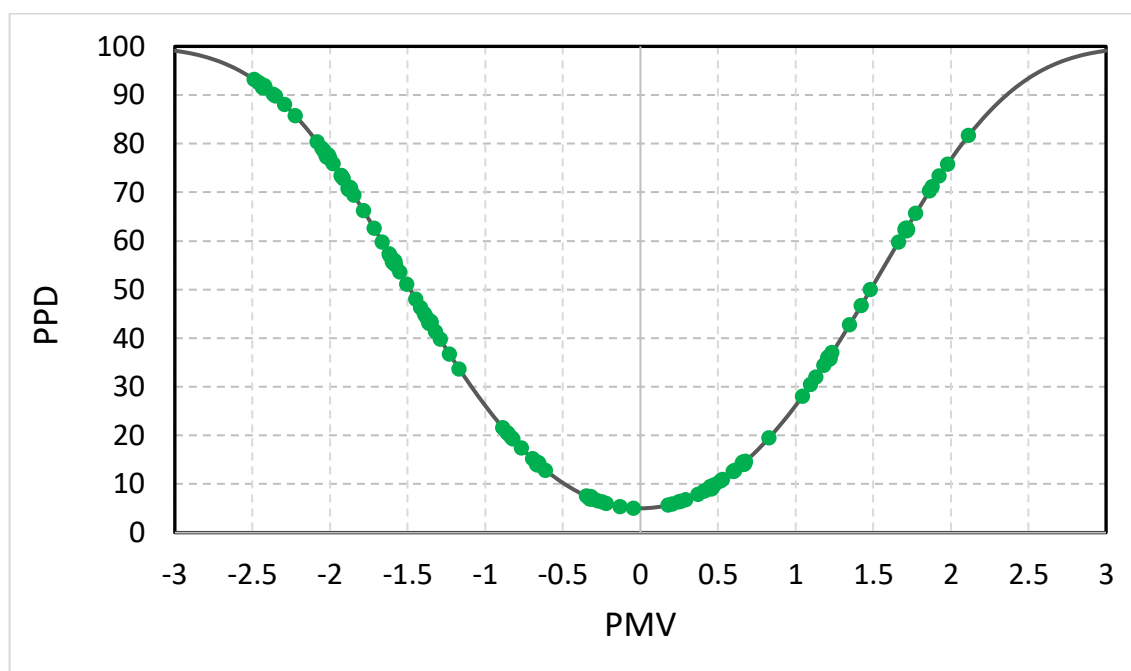


Figura 45 - Combinação dos valores de PMV e PPD de cada cenário

Na Figura 46 está representada a relação entre as zonas específicas do rosto e os valores do PMV. Tal como já foi referido no subcapítulo anterior, constata-se que existe uma maior dispersão dos valores em temperaturas inferiores e uma uniformização em temperaturas superiores. Existe uma quase linearidade dos resultados obtidos no queixo e na testa. O nariz, que exhibe valores mais dispersos em temperaturas inferiores, apresenta uma boa relação em temperaturas superiores, aquando da homogeneização das temperaturas do rosto.

Observa-se ainda no gráfico da Figura 46 que a temperatura média do rosto, identificada como “Cara”, se encontra em posição intermédia entre as bochechas e as zonas mais quentes, a testa e o queixo. Em temperaturas superiores os valores da cara são aproximadamente iguais aos valores das zonas específicas mais quentes da cara. Verifica-se que a influência das zonas mais frias da cara, nomeadamente o nariz, não levam a valores muito afastados dos máximos, a testa e o queixo, na análise do rosto como um todo.

Pode-se então concluir que no estudo do conforto térmico com recurso a câmaras termográficas, a temperatura média do rosto pode ser um bom indicador, não sendo necessária a avaliação das zonas

específicas do rosto. A testa e o queixo também são duas zonas do rosto que, devido à sua linearidade de valores durante o crescimento da temperatura ambiente, apresentam uma possibilidade no estudo do conforto térmico com recurso a câmaras termográficas.

Estes resultados estão em linha com o estudo de Ghahramani et al [18], que referiu existir uma boa correlação entre a temperatura ambiente e a média dos pontos do rosto, ao contrário do que se verifica ao nível dos pontos individuais, comprovando assim que a utilização da temperatura do rosto pode ser suficiente na avaliação do conforto térmico.

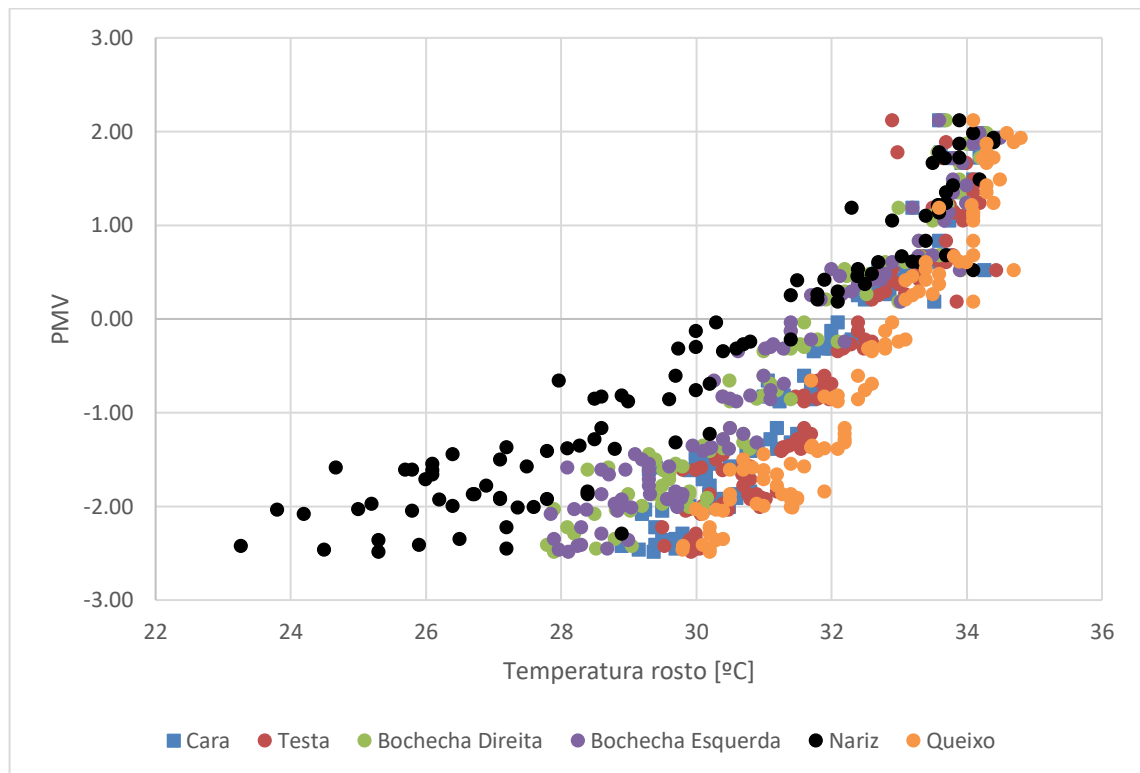


Figura 46 - Relação entre os valores de PMV e temperatura média das caixas

6

CONCLUSÃO

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais conclusões obtidas desta dissertação são:

- As temperaturas das zonas específicas do rosto são heterogéneas em temperaturas ambiente baixas e são homogéneas em temperaturas ambiente elevadas;
- O uso contínuo da máscara pode causar influência na temperatura do rosto, mesmo com um período de aclimatização de 10 minutos;
- A variação da humidade relativa ambiente não apresenta influência nos valores máximos da temperatura do rosto obtidos pela câmara termográfica NEC;
- A variação da humidade relativa ambiente apresenta uma reduzida influência nos valores máximos da temperatura do rosto obtidos pela câmara termográfica Fluke;
- A variação da temperatura ambiente apresenta influência nos valores máximos da temperatura do rosto obtidos por ambas as câmaras termográficas;
- Existe uma diferença de $+0.5^{\circ}\text{C}$ entre as temperaturas máximas médias obtidas pelas câmaras termográficas NEC e Fluke;
- O termómetro com contacto apresenta temperaturas afastadas de cada uma das câmaras termográficas, não podendo existir uma ligação possível para efetuar uma comparação;
- O termómetro sem contacto apresenta uma temperatura medida pelo equipamento que se encontra mais próxima dos valores das duas câmaras termográficas, em particular da Fluke;
- As duas câmaras termográficas apresentam uma associação das localizações dos pontos mais quentes no mesmo cenário. A boca é a zona do rosto que mais frequentemente apresenta localizações do ponto mais quente, em ambas as câmaras termográficas;
- Nos valores de temperatura ambiente inferiores, os valores das zonas específicas do rosto exibem uma maior heterogeneidade, com o nariz como zona mais fria e apresentando valores claramente discrepantes face às restantes zonas do rosto;
- Nos valores de temperatura ambiente intermédios, a dispersão entre os valores das zonas específicas torna-se menos acentuada;
- Nos valores de temperatura ambiente superiores, existe um evidente aproximar das temperaturas das zonas específicas do rosto;

- As zonas do rosto com a temperatura mais elevada são o queixo e a testa;
- A testa e o queixo também são duas zonas do rosto que, devido à sua linearidade de valores durante o crescimento da temperatura ambiente, apresentam uma possibilidade no estudo do conforto térmico com recurso a câmaras termográficas;
- A temperatura do rosto é um indicador suficiente na avaliação de conforto térmico, não sendo necessária a avaliação das zonas específicas do rosto.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com base no presente estudo e, com vista a desenvolvimentos futuros nesta área, sugere-se:

- Estudo laboratorial com recurso à termografia de infravermelhos, utilizando uma amostragem diversificada de indivíduos em estudo;
- Estudo em ambiente real visando a avaliação do conforto térmico recorrendo à termografia de infravermelhos;
- Estudo para a avaliação da influência associada ao uso prolongado de máscara na temperatura do rosto;
- Desenvolvimento de um algoritmo de previsão do PMV de acordo com as temperaturas do rosto obtidas pela termografia de infravermelhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

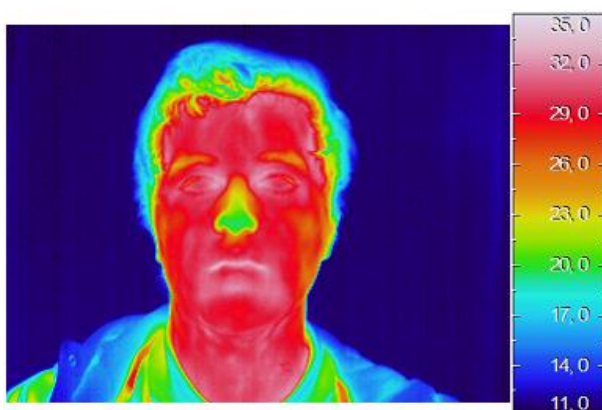
- [1] Vollmer, M., Möllmann, K.-P. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley-VCH, Weinheim, 2010.
- [2] Schaschke, Carl. *Dictionary of Chemical Engineering*. Oxford University Press, 2014.
- [3] Thermoworks (<https://www.thermoworks.com/emissivity-table>). 12/04/2021.
- [4] Barreira, E. *Uma reflexão sobre os fatores que afetam a termografia de infravermelhos na inspeção e diagnóstico de edifícios*. Livro de Atas. Patologia e Reabilitação – Técnicas de Diagnóstico e Inspeção. P. 882-891.
- [5] Karbhari, V.M., Lee, L. S., *Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures*. Woodhead Publishing, 2011.
- [6] Barreira, E., de Freitas, V. P. *Evaluation of building materials using infrared thermography*. Construction and Building Materials, vol. 21, 2007, p. 218–224, Elsevier.
- [7] Balaras, C. A., Argiriou, A. A. *Infrared thermography for building diagnostics*. Energy and Building, vol. 34, 2002, p. 171-183, Elsevier.
- [8] Lahiri, B. B., Bagavathiappan, S., Jayakumar, T., Philip, J. *Medical applications of infrared thermography: A review*. Infrared Physics & Technology, vol. 55, 2012, p. 221-235, Elsevier.
- [9] Nishiura, H., Kamiya, K. *Fever screening during the influenza (H1N1-2009) pandemic at Narita International Airport, Japan*. BMC Infectious Diseases, 2011.
- [10] FDA (<https://www.fda.gov/medical-devices/general-hospital-devices-and-supplies/thermal-imaging-systems-infrared-thermographic-systems-thermal-imaging-cameras>). 16/03/2021.
- [11] *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ASHRAE 55, 2013.
- [12] *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. ASHRAE, 2005.
- [13] International Organization for Standardization. *Ergonomics of the thermal: determination of metabolic rate: ISO 8996: 2004*. 2004, ISO, Geneva.
- [14] Matias, L. *Desenvolvimento de um modelo adaptativo para definição das condições de conforto térmico em Portugal*. Universidade Técnica De Lisboa - Instituto Superior Técnico. Dissertação de Doutoramento, 2010.
- [15] International Organization for Standardization. *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, ISO, Geneva.
- [16] Arquivo da FEUP (<https://biblioteca.fe.up.pt/arquivo/glossario/humidade-relativa/index.html>). 14/06/2021
- [17] Encyclopedia.com (<https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/thermoneutral-zone>). 13/03/2021.
- [18] Ghahramani, A., Castro, G., Becerik-Gerber, B., Yu, X. *Infrared thermography of human face for monitoring thermoregulation performance and estimating personal thermal comfort*. Building and Environment, vol. 109, 2016, p. 1-11, Elsevier.

- [19] Tejedor, B., Casals, M., Gangolells, M. Macarulla, M. Forcada, N. *Human comfort modelling for elderly people by infrared thermography: Evaluating the thermoregulation system responses in an indoor environment during winter*. Building and Environment, vol. 186, 2020, Elsevier.
- [20] Li, D., Menassa, C. C., Kamat, V. R. *Non-intrusive interpretation of human thermal comfort through analysis of facial infrared thermography*. Energy & Buildings, vol. 176, 2018, p. 246-261, Elsevier.
- [21] Fernández-Cuevas, I., Bouzas Marins, J. C., Arnáiz Lastras, J., Gómez Carmona, P. M., Piñonosa Cano, S., Ángel García-Concepción, M., Sillero-Quintana, M. *Classification of factors influencing the use of infrared thermography in humans: A review*. Infrared Physics & Technology, vol. 71, 2015, p. 28-55, Elsevier.
- [22] Fluke (<https://www.fluke.com/pt-pt/produto/camaras-de-imagens-termicas/tis60plus>). 25/05/2021.
- [23] Onsetcomp (<https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux100-011a/>). 25/05/2021.
- [24] Borkovich, K. A., Ebbole, D. J.. *Cellular and Molecular Biology of Filamentous Fungi*. American Society for Microbiology (ASM), 2010.

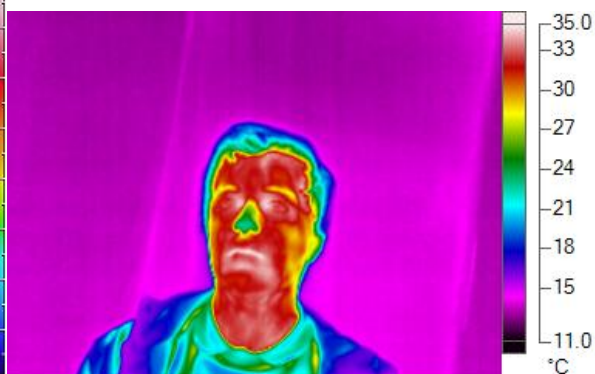
ANEXO

TERMOGRAMAS CAPTADOS

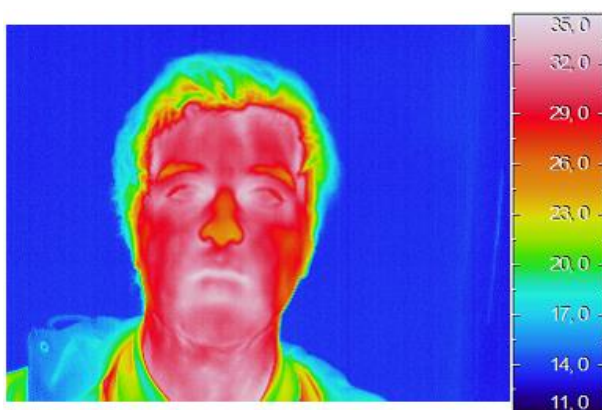
HUMIDADE RELATIVA 40 %



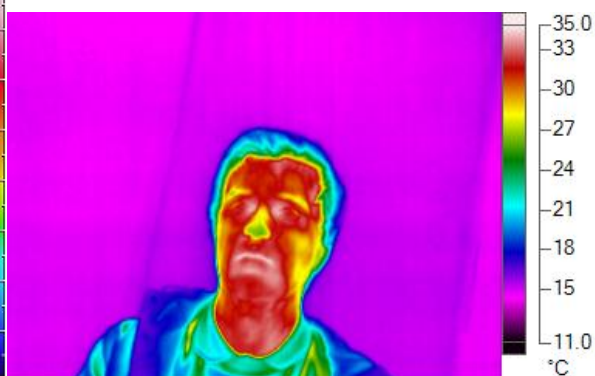
10°C - NEC



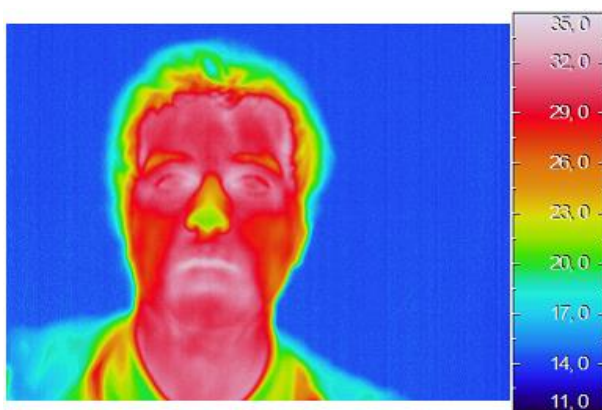
10°C - Fluke



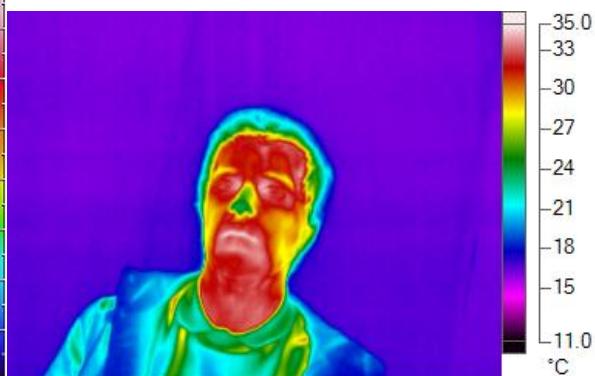
12°C - NEC



12°C - Fluke



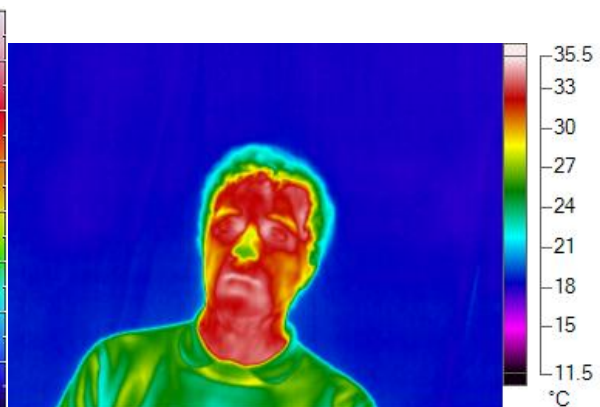
14°C - NEC



14°C - Fluke



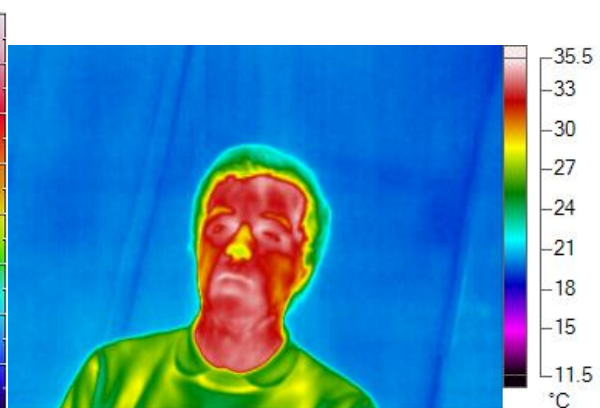
16°C - NEC



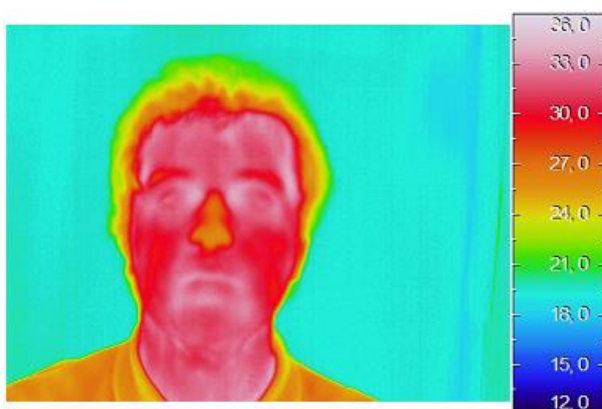
16°C - Fluke



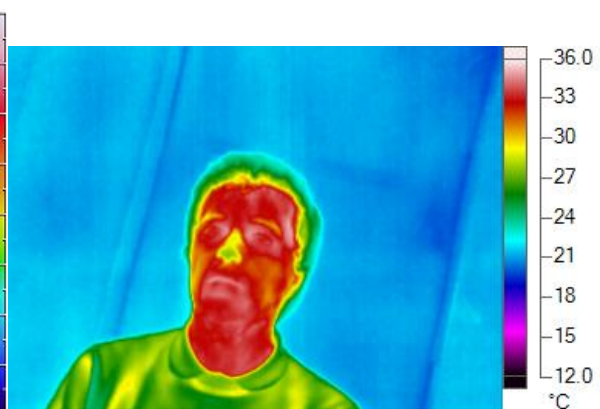
18°C - NEC



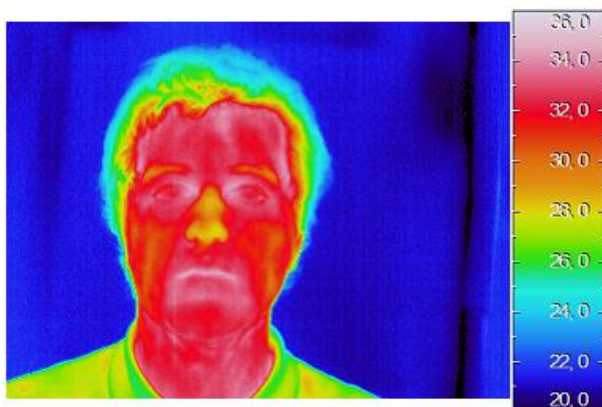
18°C - Fluke



20°C - NEC



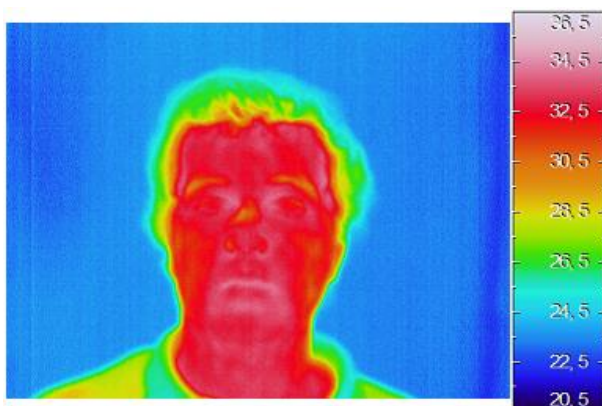
20°C - Fluke



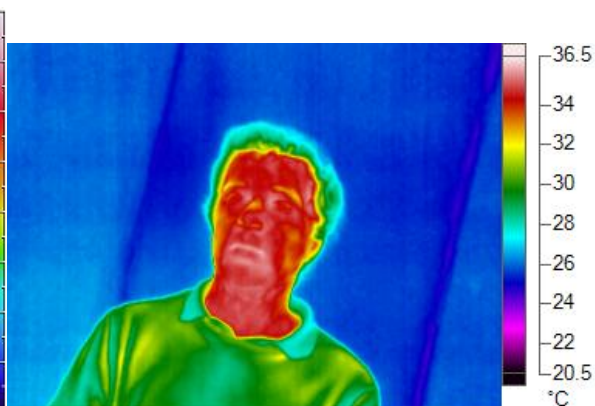
22°C - NEC



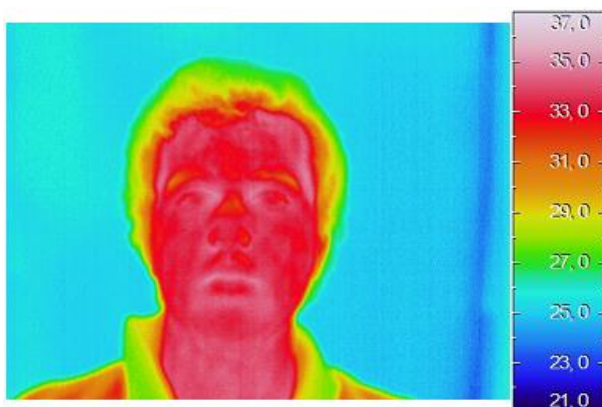
22°C - Fluke



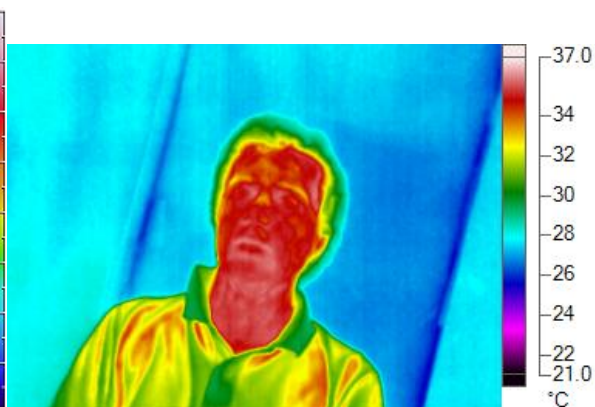
24°C - NEC



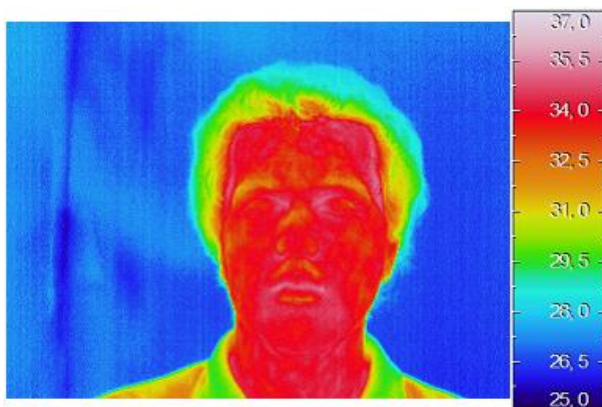
24°C - Fluke



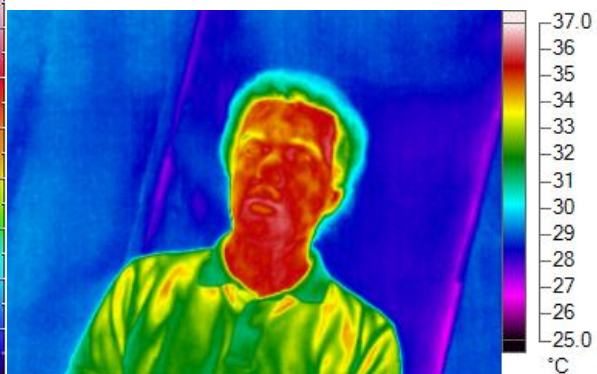
26°C - NEC



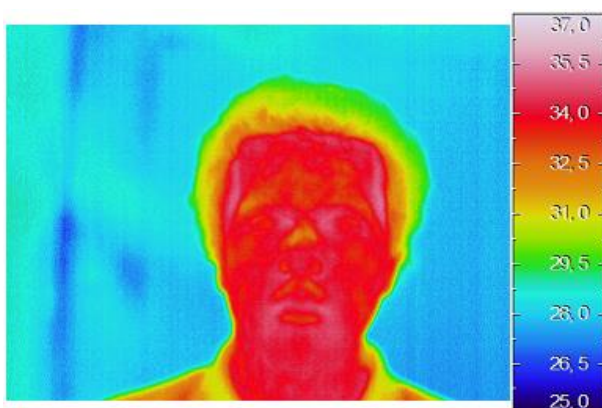
26°C - Fluke



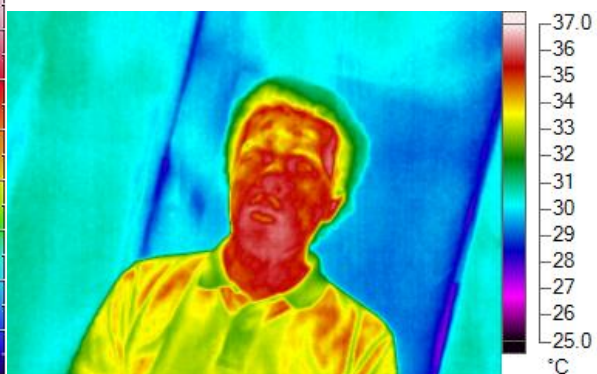
28°C - NEC



28°C - Fluke

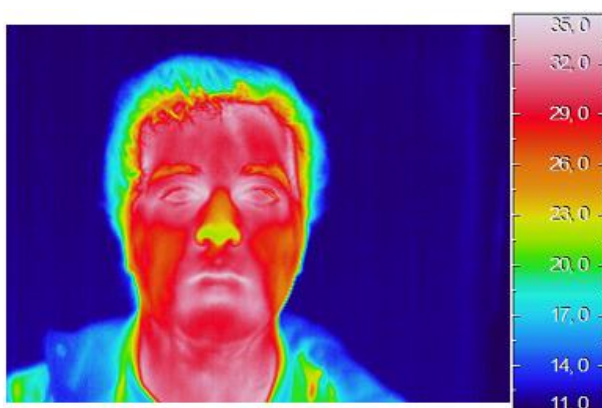


30°C - NEC



30°C - Fluke

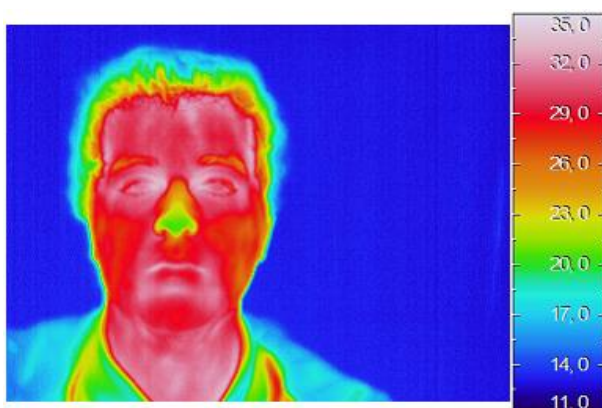
HUMIDADE RELATIVA 45 %



10°C - NEC



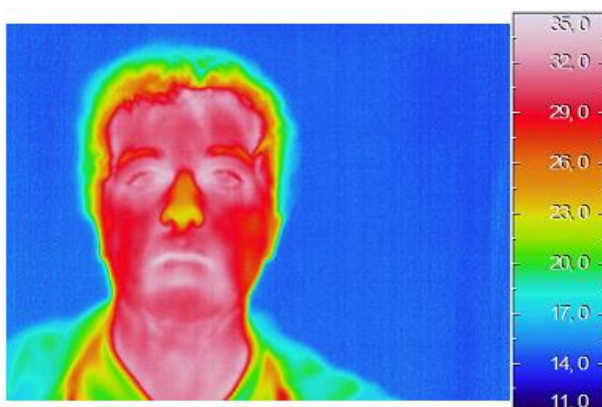
10°C - Fluke



12°C - NEC



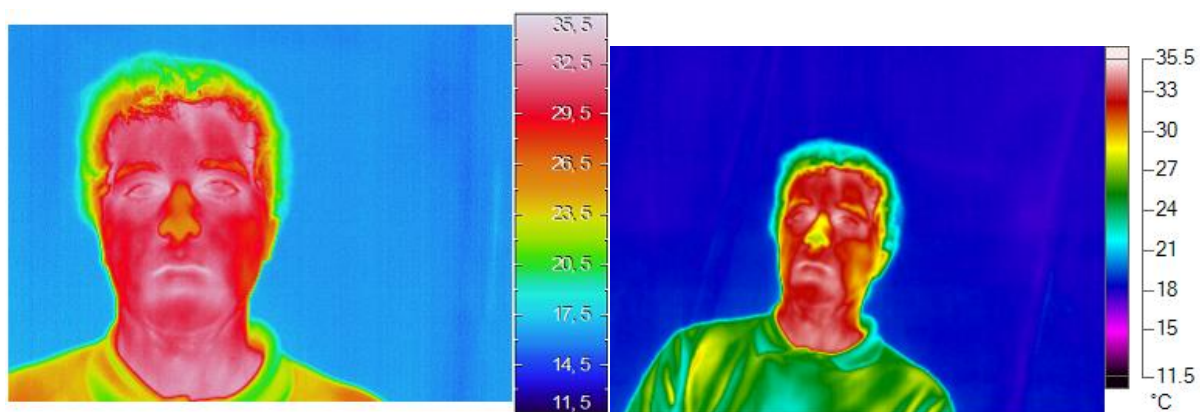
12°C - Fluke



14°C - NEC

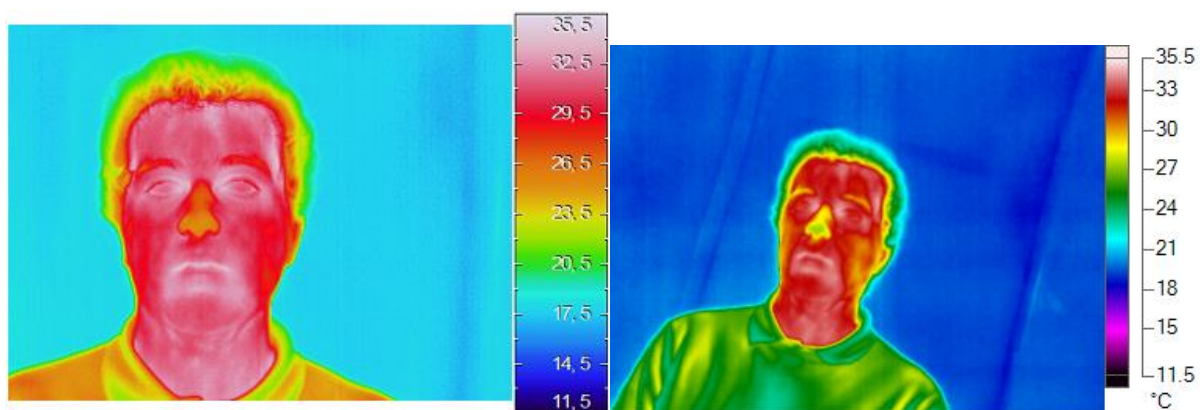


14°C - Fluke



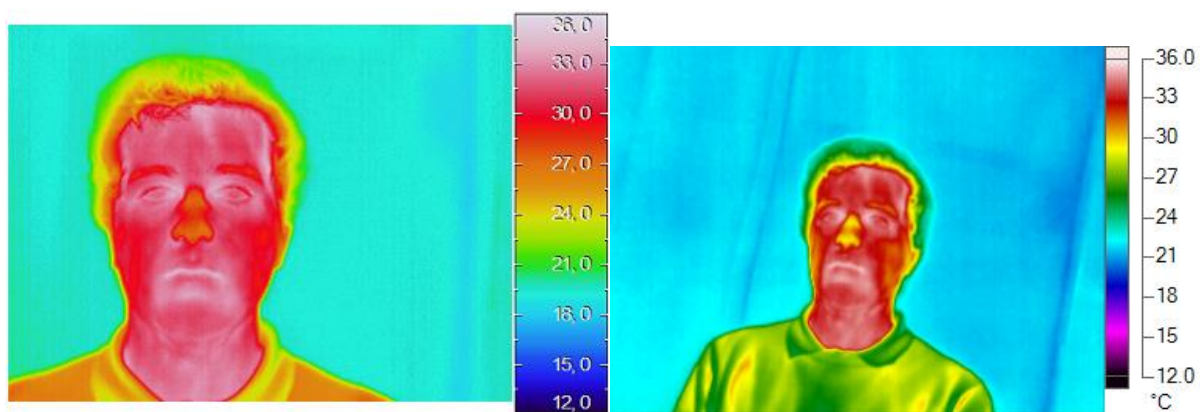
16°C - NEC

16°C - Fluke



18°C - NEC

18°C - Fluke



20°C - NEC

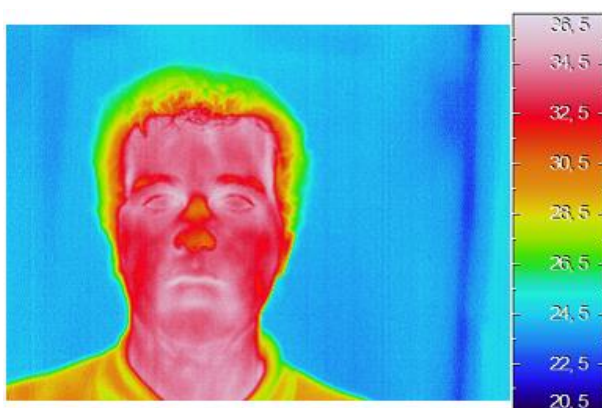
20°C - Fluke



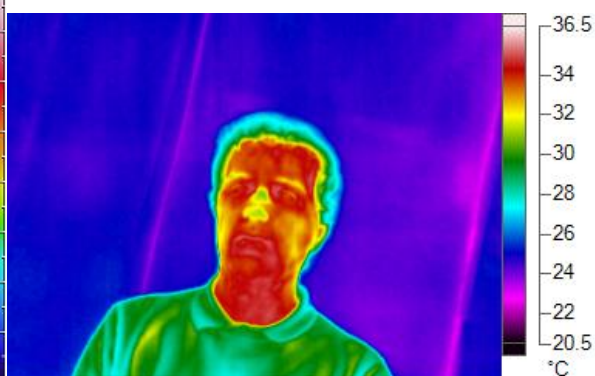
22°C - NEC



22°C - Fluke



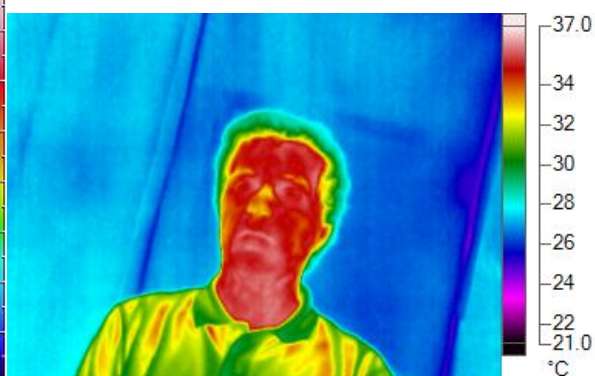
24°C - NEC



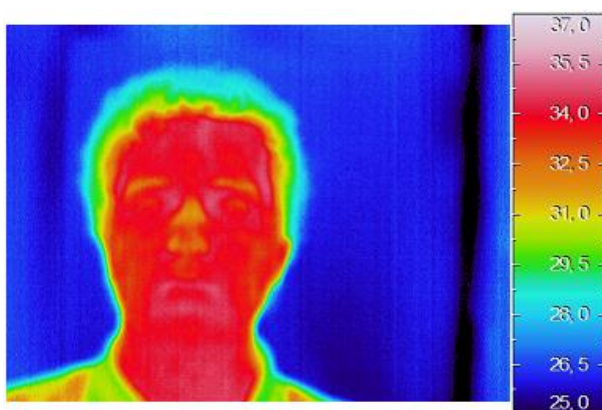
24°C - Fluke



26°C - NEC



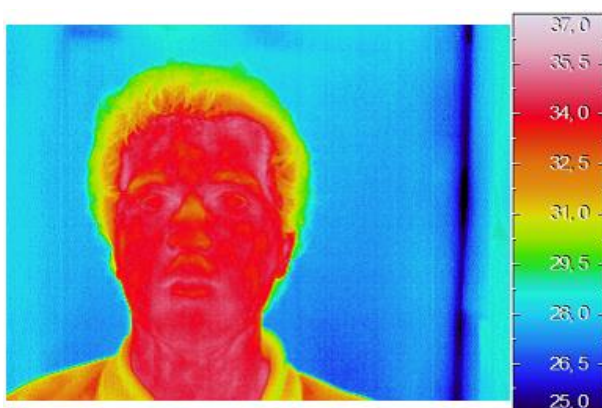
26°C - Fluke



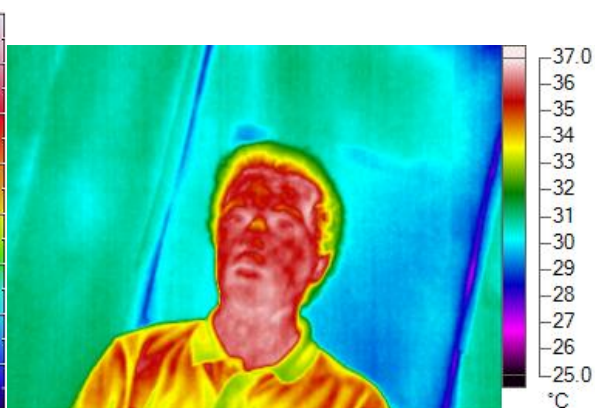
28°C - NEC



28°C - Fluke

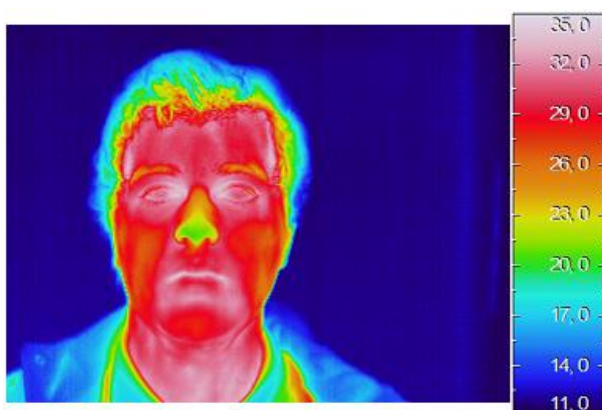


30°C - NEC



30°C - Fluke

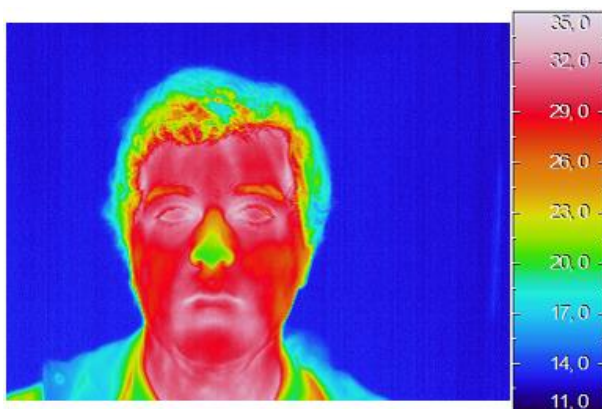
HUMIDADE RELATIVA 50 %



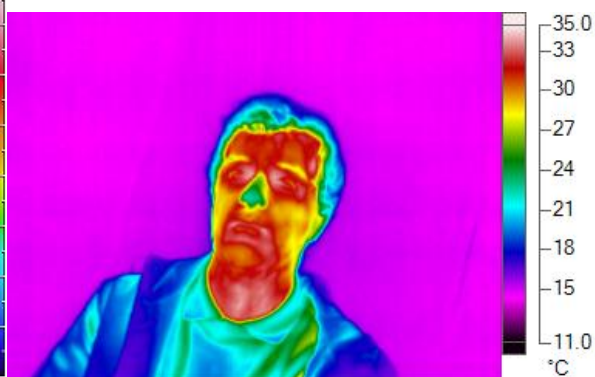
10°C - NEC



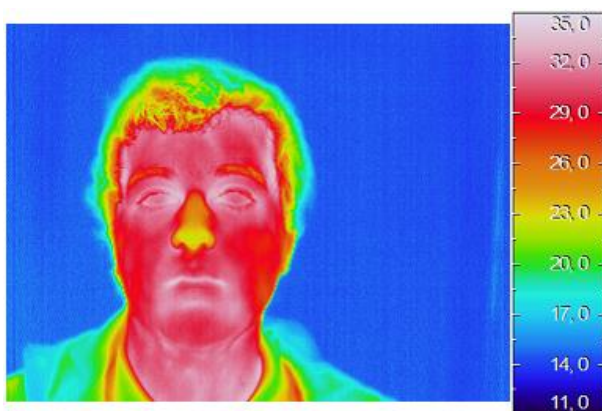
10°C - Fluke



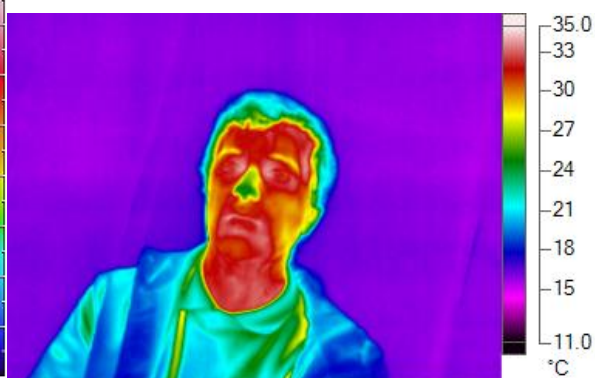
12°C - NEC



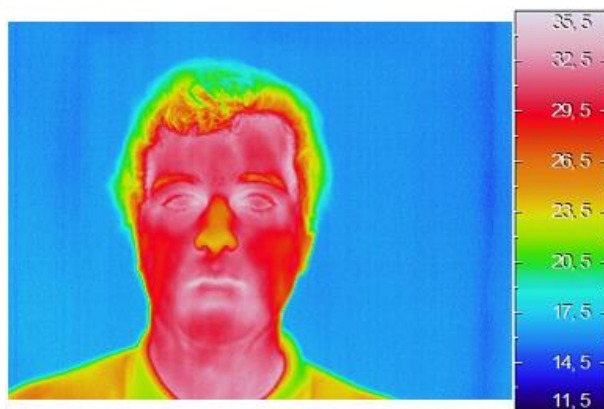
12°C - Fluke



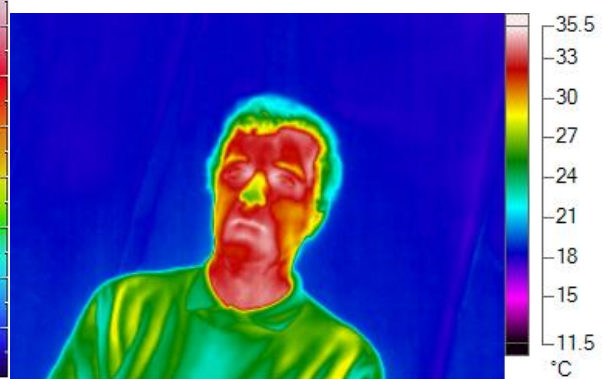
14°C - NEC



14°C - Fluke



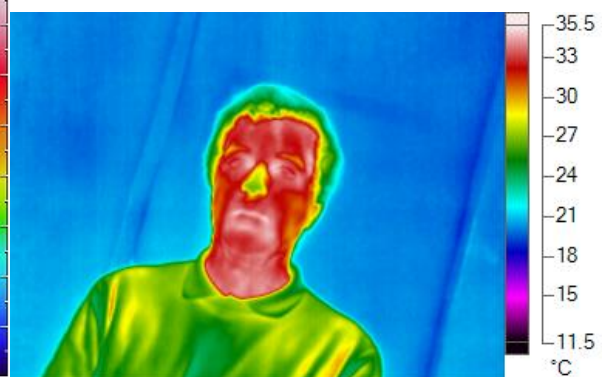
16°C - NEC



16°C - Fluke



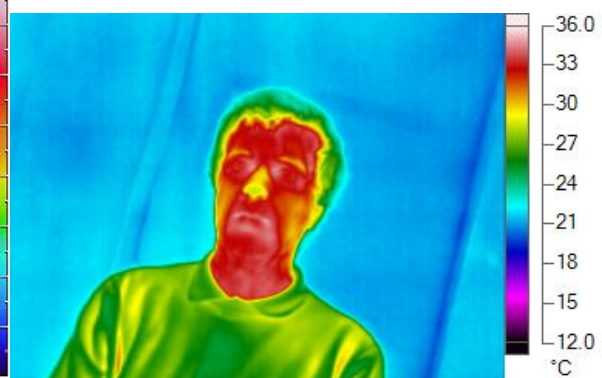
18°C - NEC



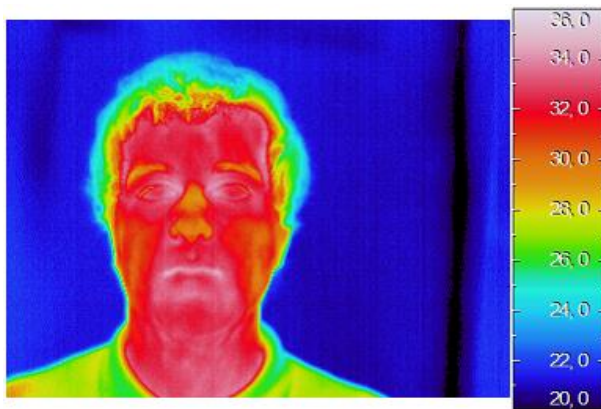
18°C - Fluke



20°C - NEC



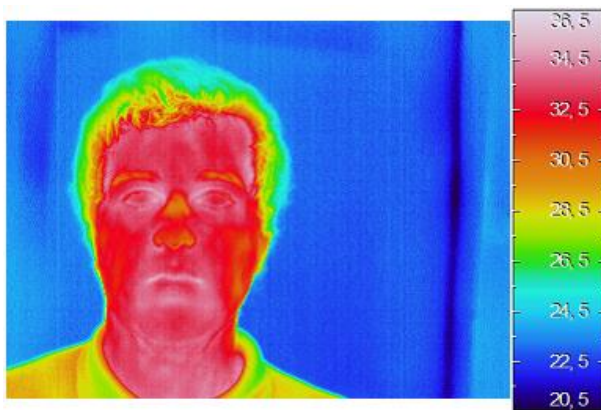
20°C - Fluke



22°C - NEC



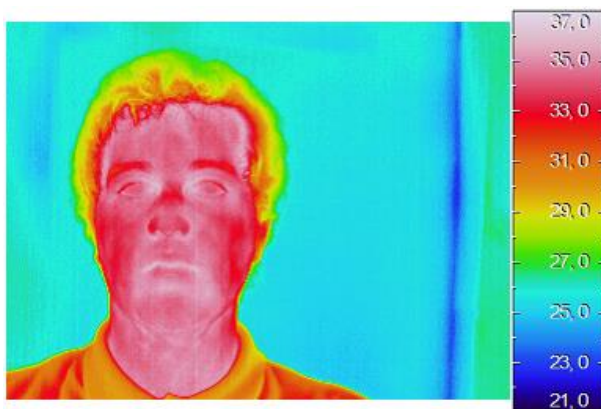
22°C - Fluke



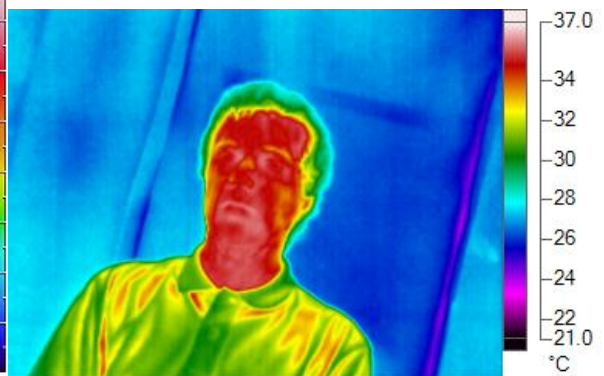
24°C - NEC



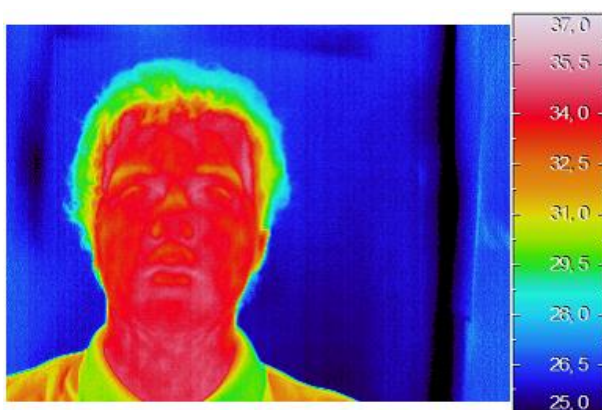
24°C - Fluke



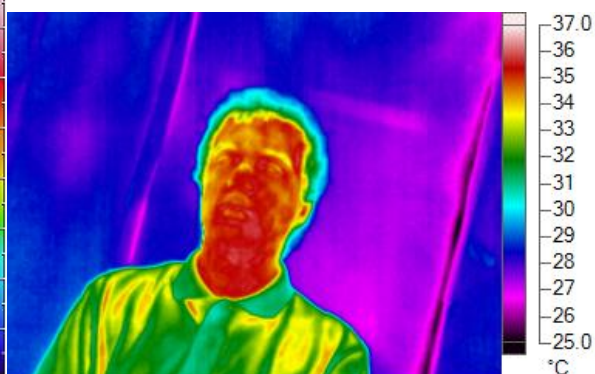
26°C - NEC



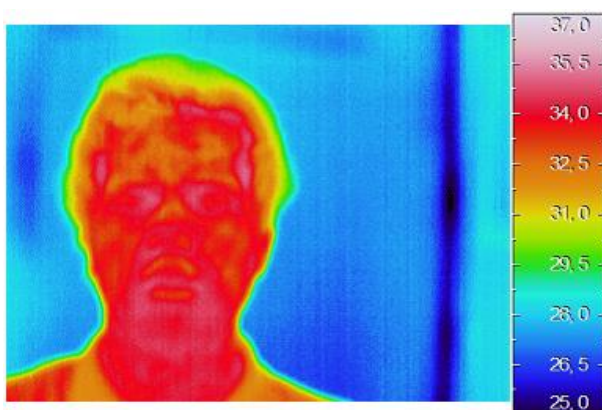
26°C - Fluke



28°C - NEC



28°C - Fluke

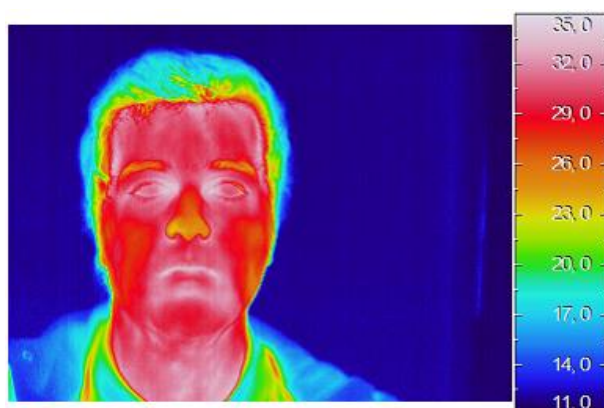


30°C - NEC



30°C - Fluke

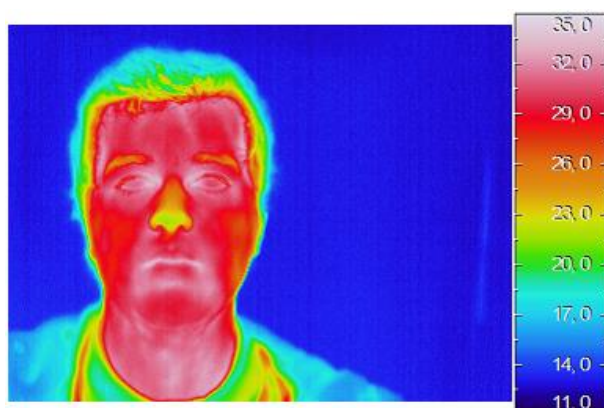
HUMIDADE RELATIVA 55 %



10°C - NEC



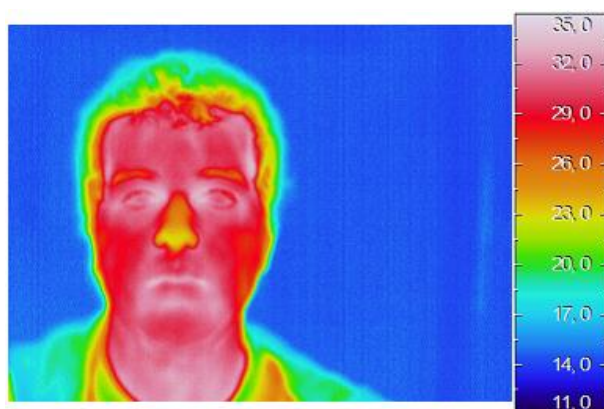
10°C - Fluke



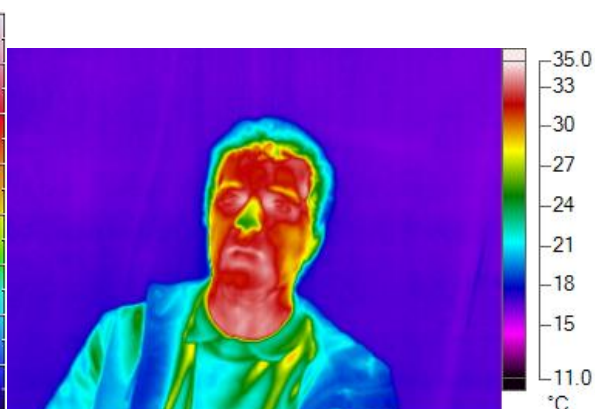
12°C - NEC



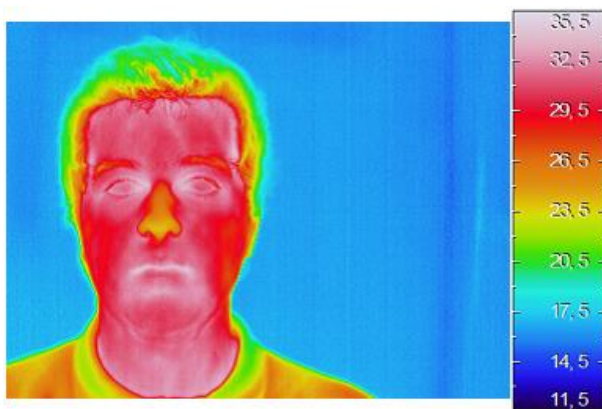
12°C - Fluke



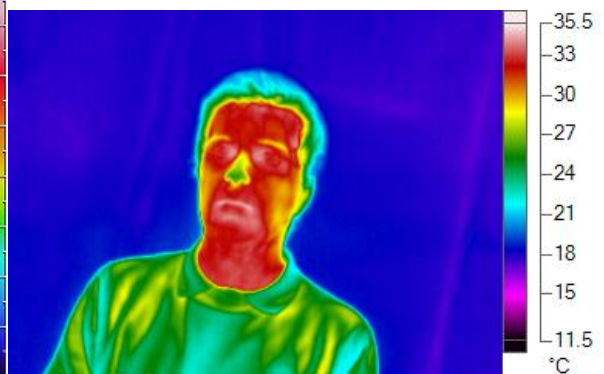
14°C - NEC



14°C - Fluke



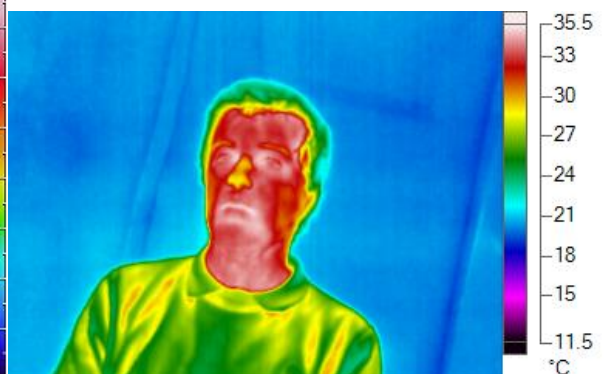
16°C - NEC



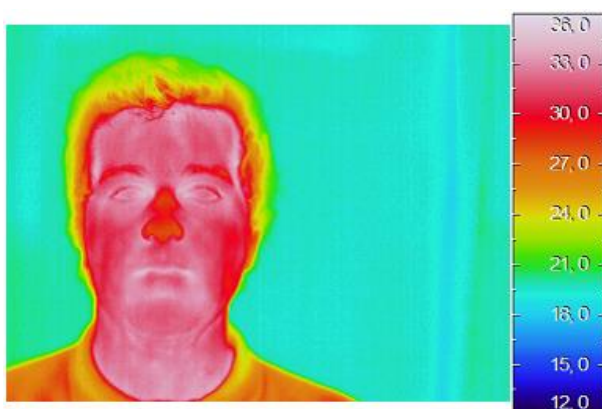
16°C - Fluke



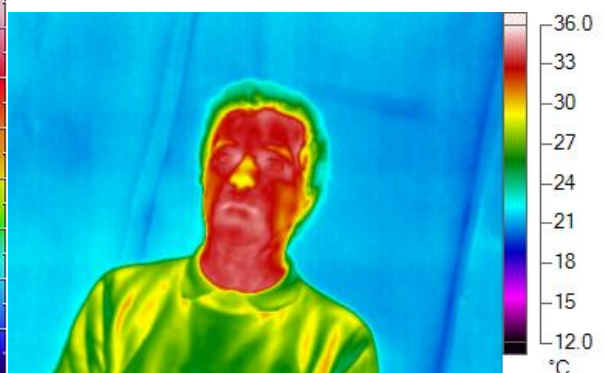
18°C - NEC



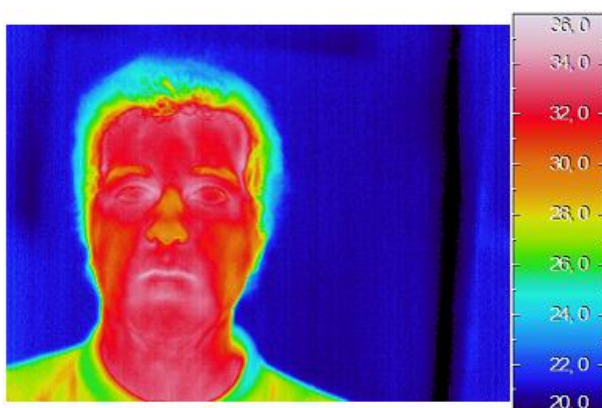
18°C - Fluke



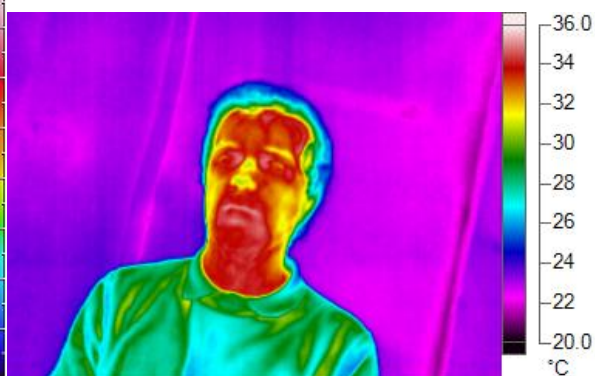
20°C - NEC



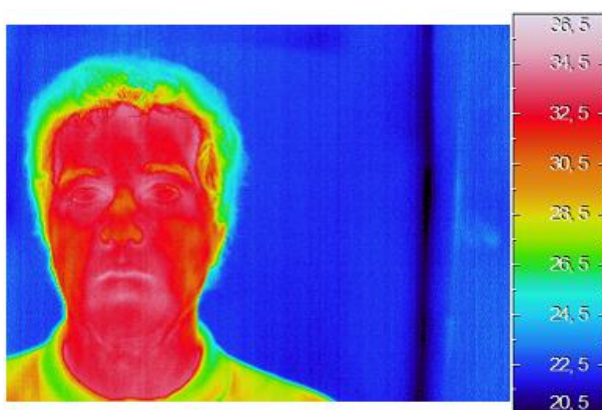
20°C - Fluke



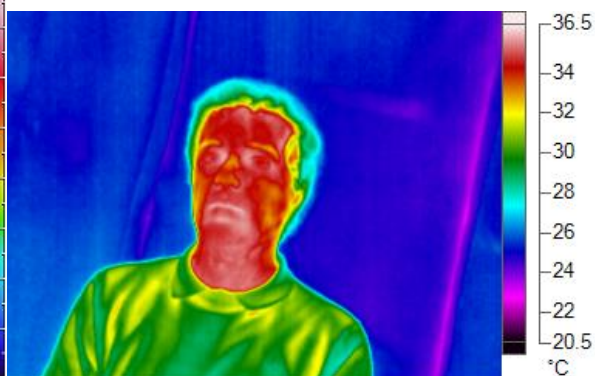
22°C - NEC



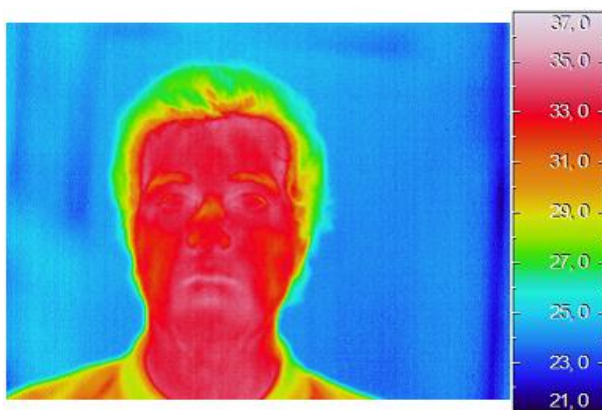
22°C - Fluke



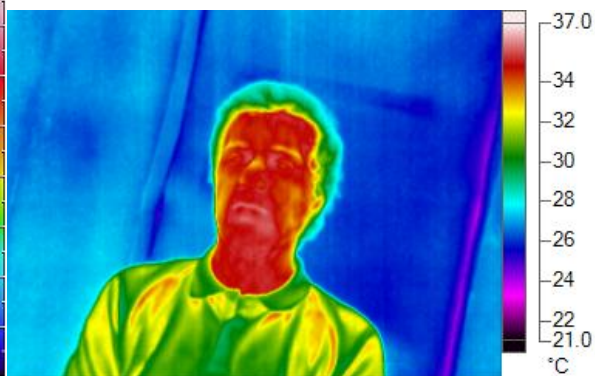
24°C - NEC



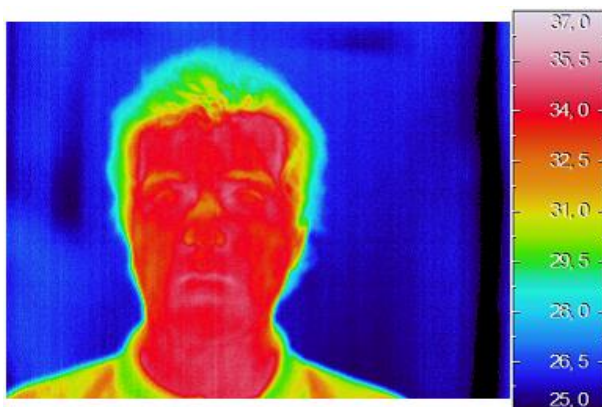
24°C - Fluke



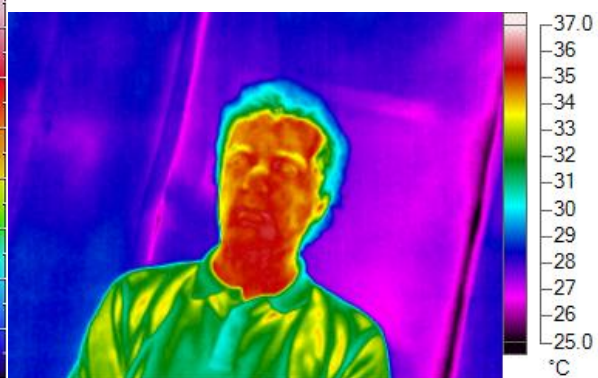
26°C - NEC



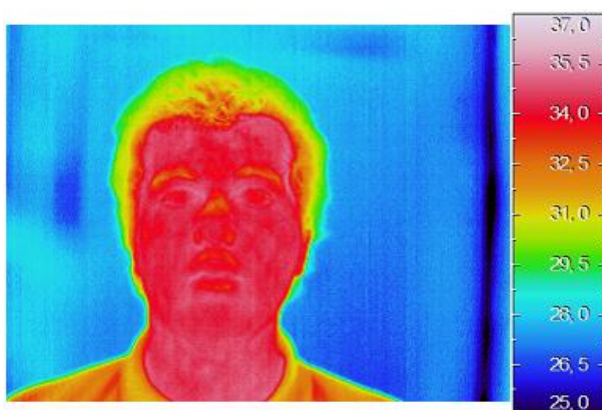
26°C - Fluke



28°C - NEC



28°C - Fluke

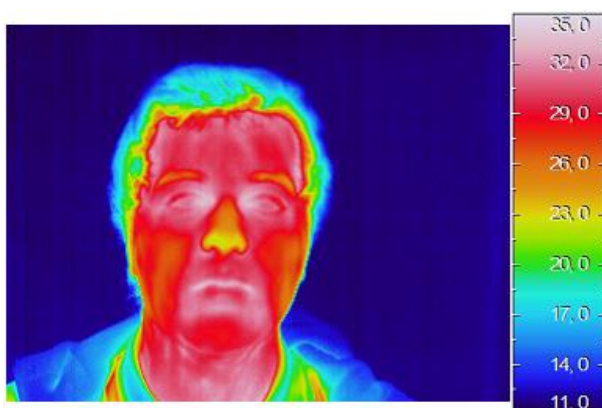


30°C - NEC



30°C - Fluke

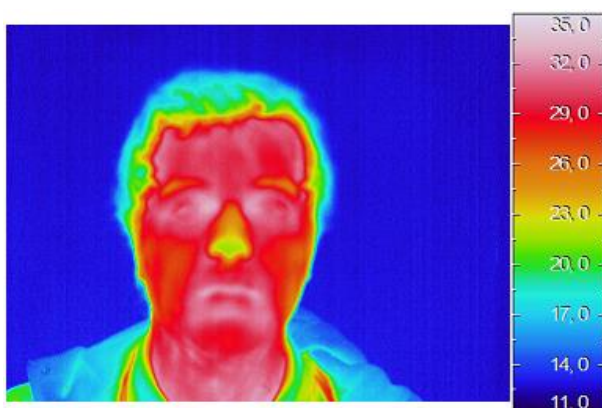
HUMIDADE RELATIVA 60 %



10°C - NEC



10°C - Fluke



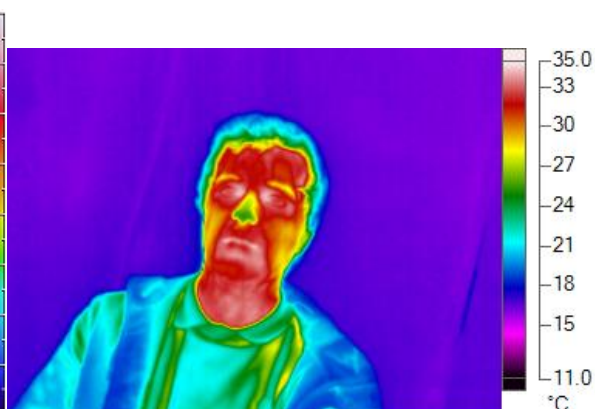
12°C - NEC



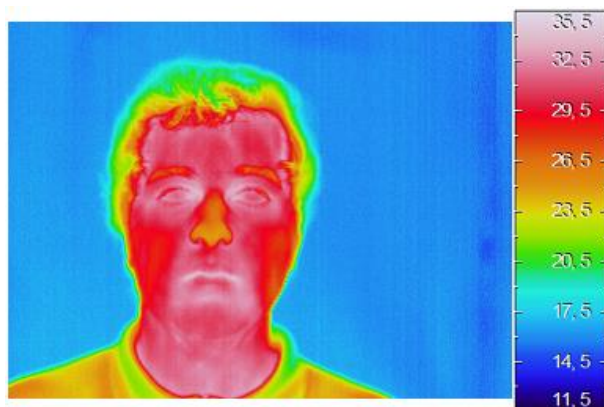
12°C - Fluke



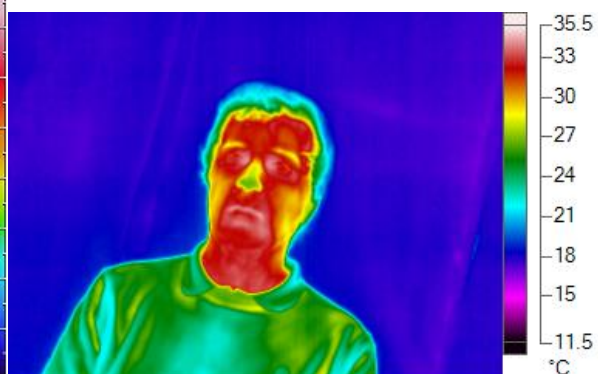
14°C - NEC



14°C - Fluke



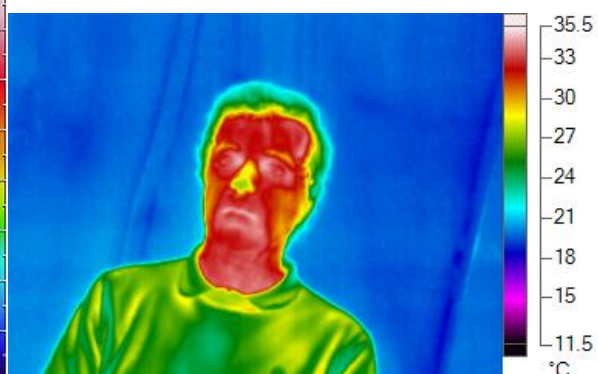
16°C - NEC



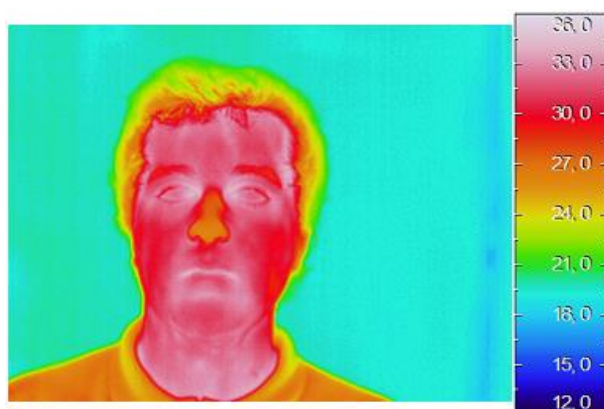
16°C - Fluke



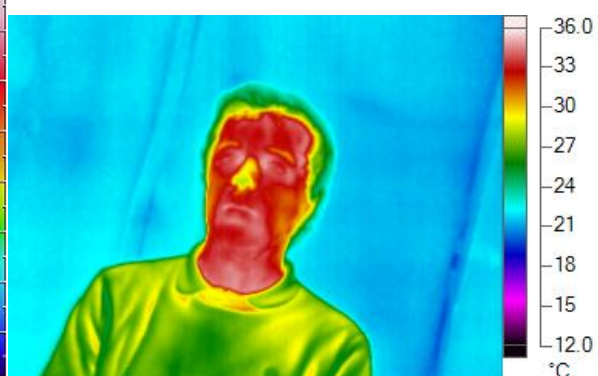
18°C - NEC



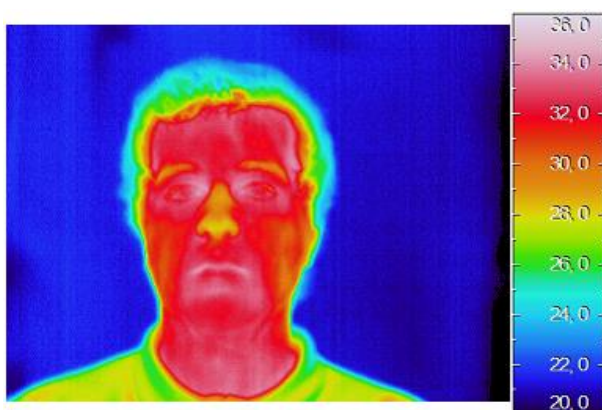
18°C - Fluke



20°C - NEC



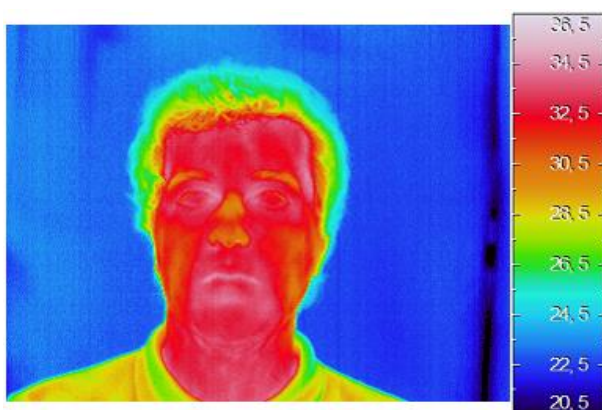
20°C - Fluke



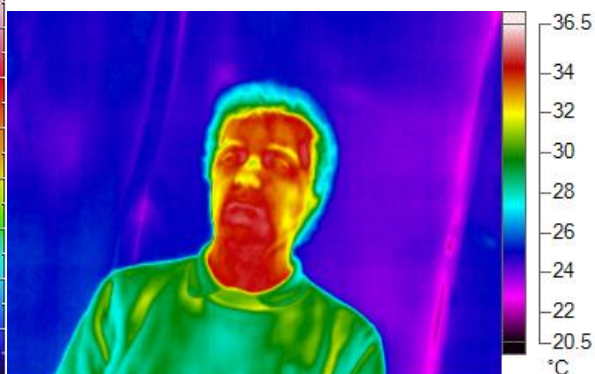
22°C - NEC



22°C - Fluke



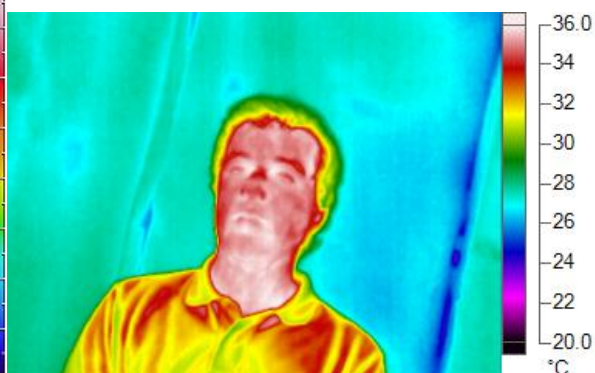
24°C - NEC



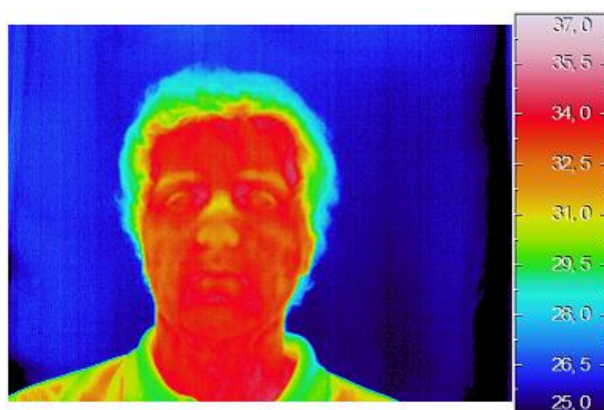
24°C - Fluke



26°C - NEC



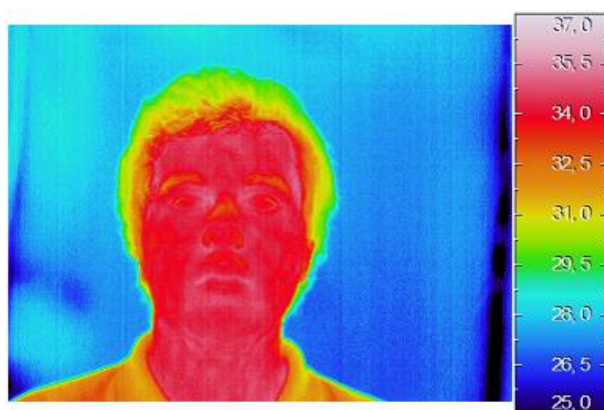
26°C - Fluke



28°C - NEC



28°C - Fluke

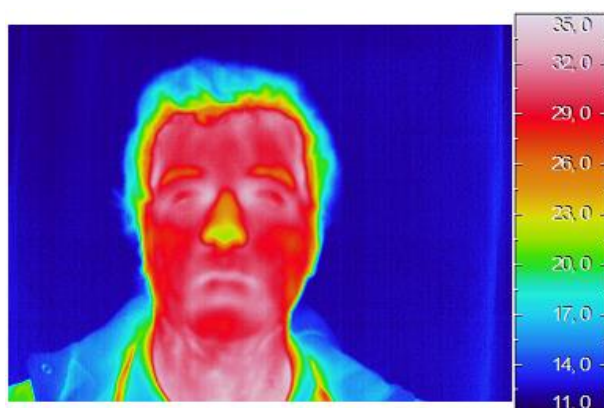


30°C - NEC



30°C - Fluke

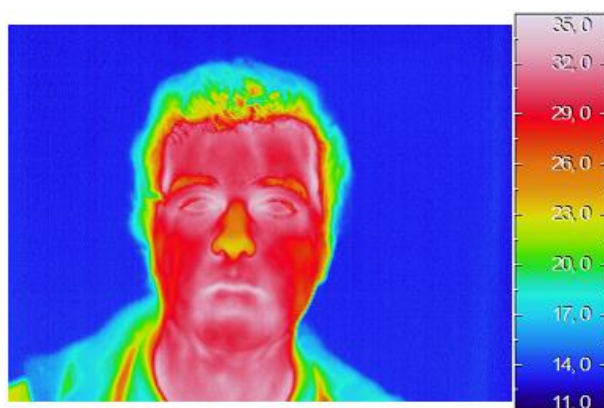
HUMIDADE RELATIVA 65 %



10°C - NEC



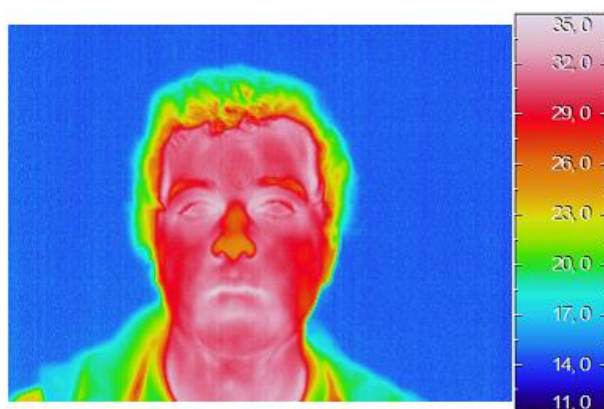
10°C - Fluke



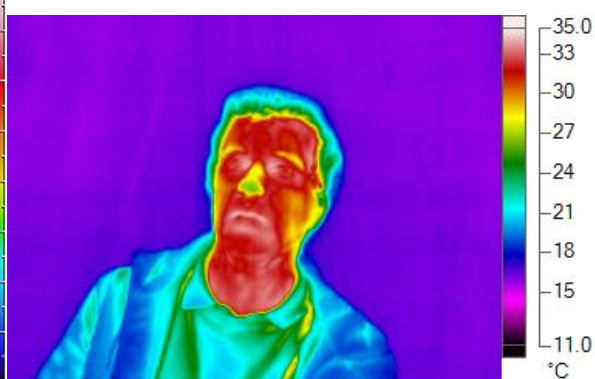
12°C - NEC



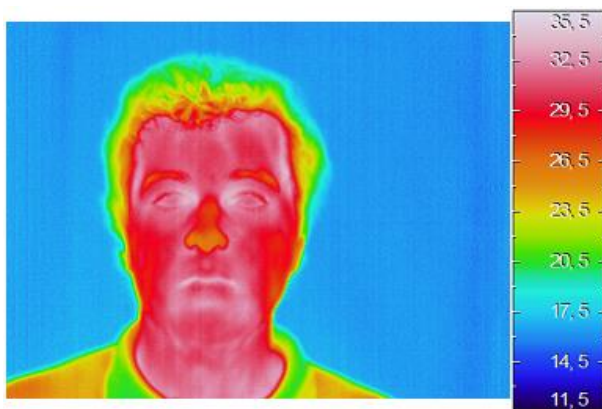
12°C - Fluke



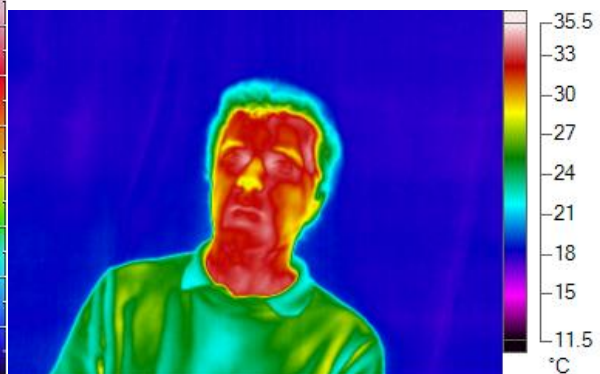
14°C - NEC



14°C - Fluke



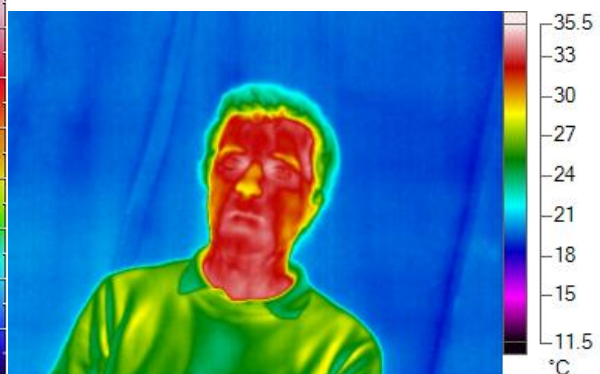
16°C - NEC



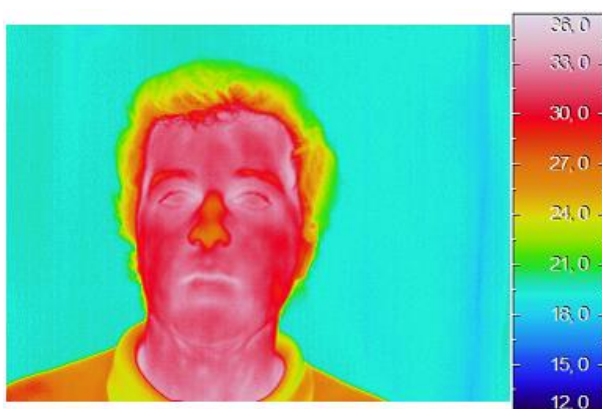
16°C - Fluke



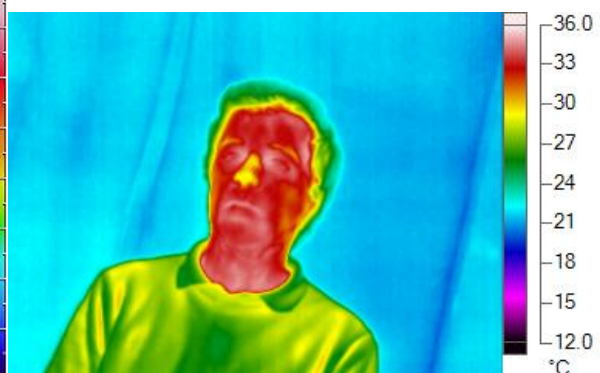
18°C - NEC



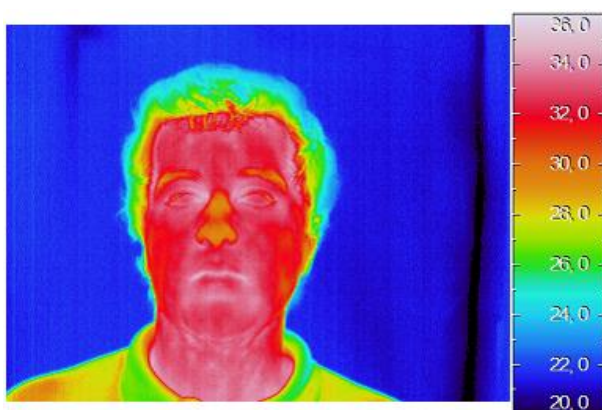
18°C - Fluke



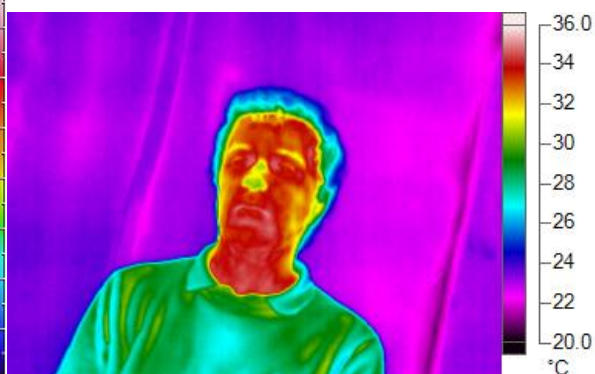
20°C - NEC



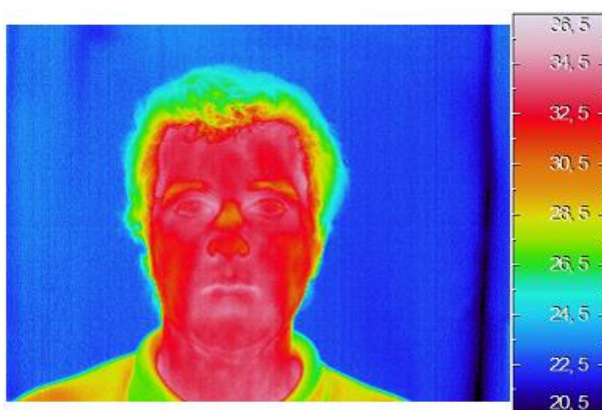
20°C - Fluke



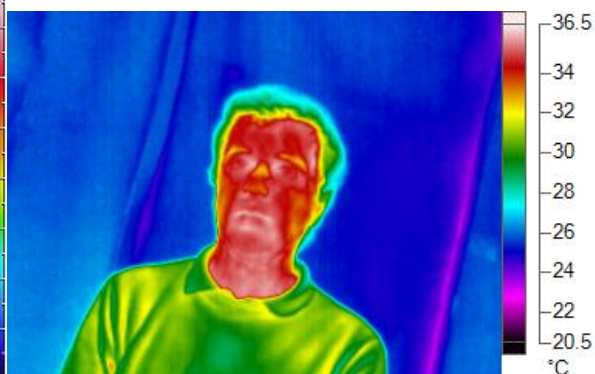
22°C - NEC



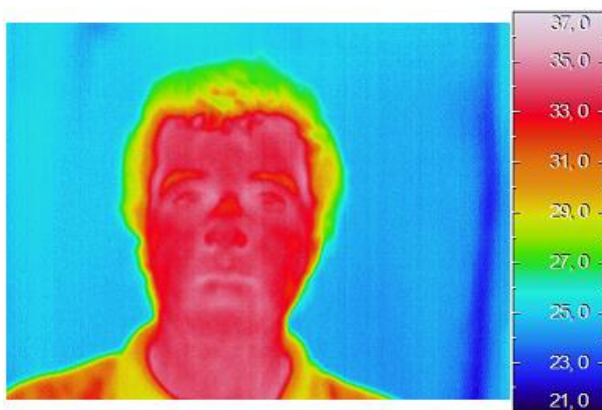
22°C - Fluke



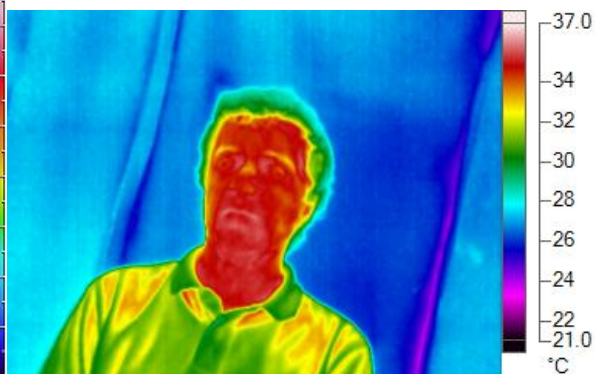
24°C - NEC



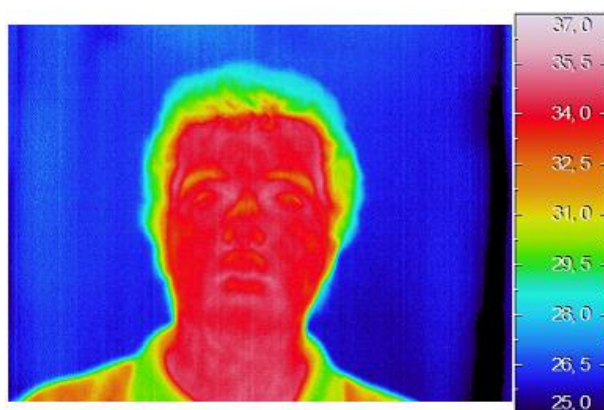
24°C - Fluke



26°C - NEC



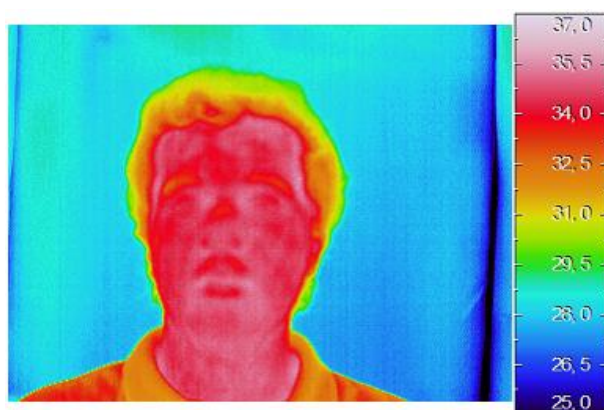
26°C - Fluke



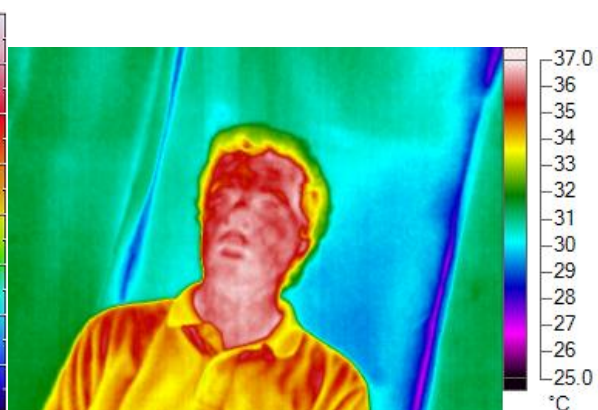
28°C - NEC



28°C - Fluke

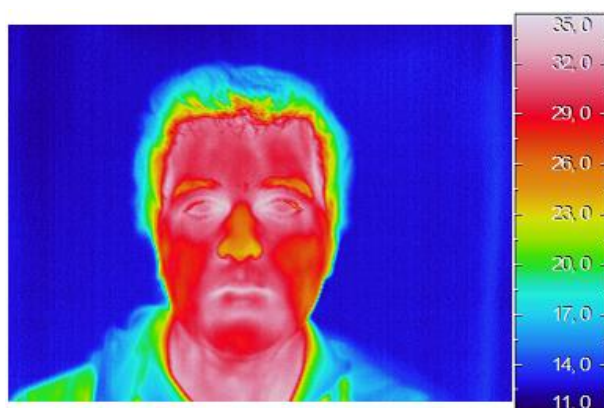


30°C - NEC



30°C - Fluke

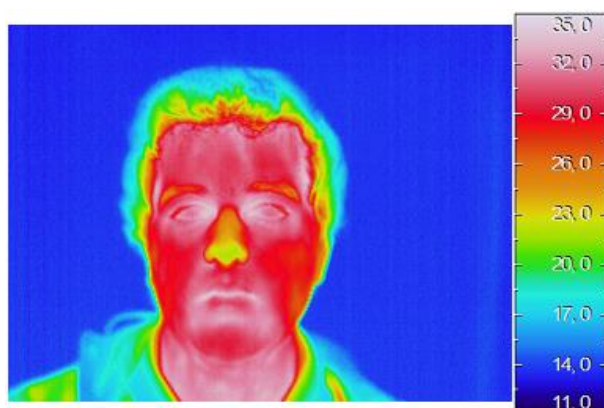
HUMIDADE RELATIVA 70 %



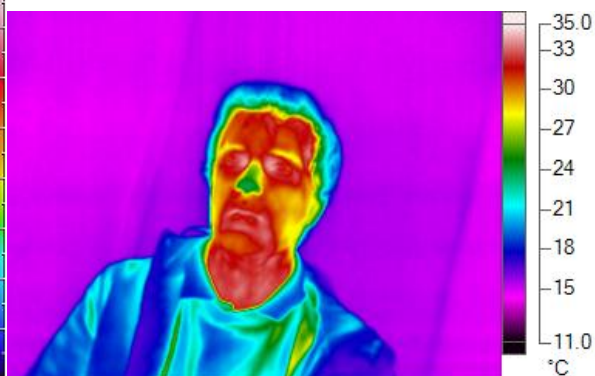
10°C - NEC



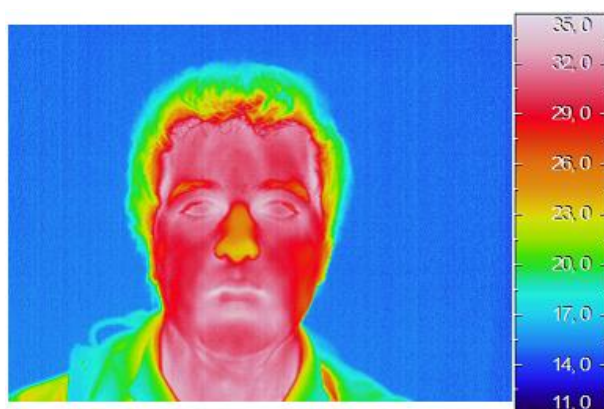
10°C - Fluke



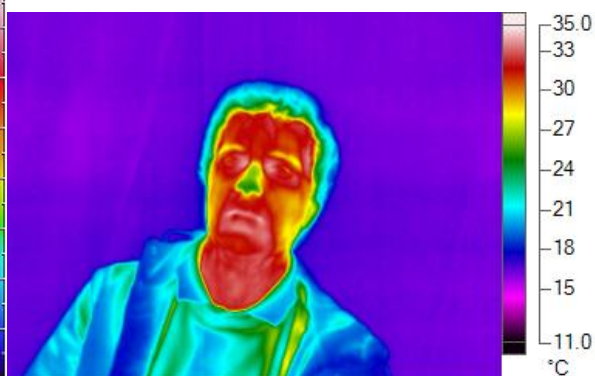
12°C - NEC



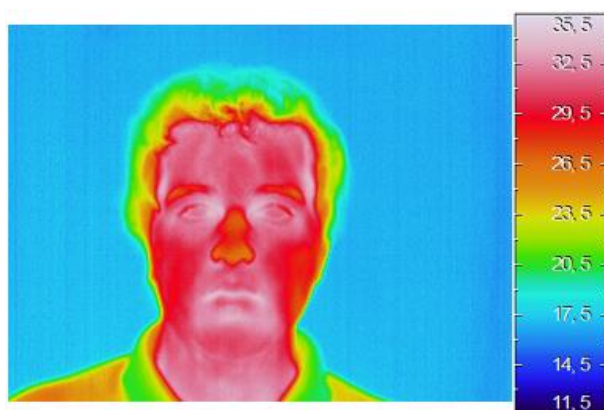
12°C - Fluke



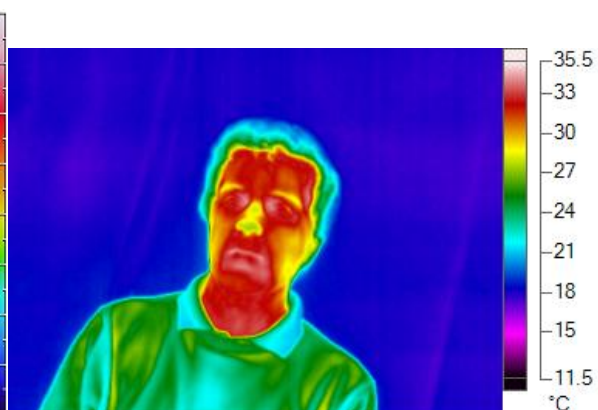
14°C - NEC



14°C - Fluke



16°C - NEC



16°C - Fluke



18°C - NEC



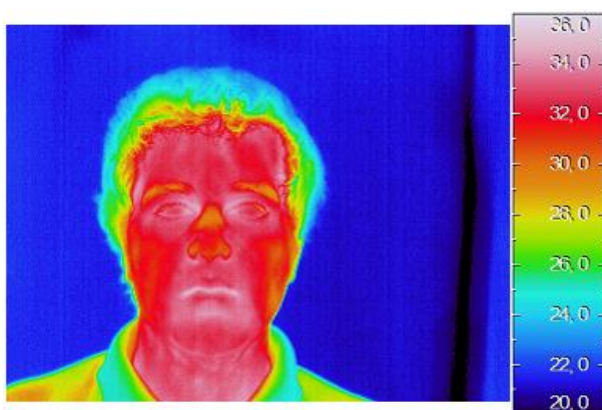
18°C - Fluke



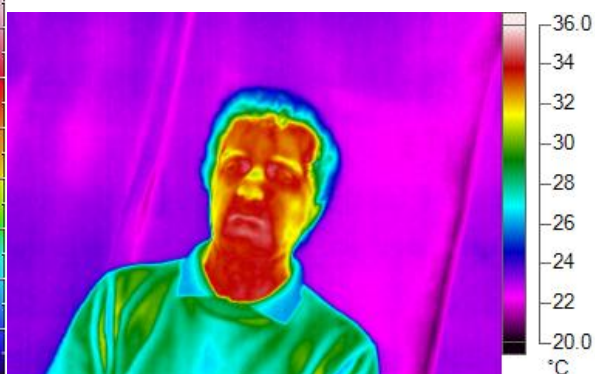
20°C - NEC



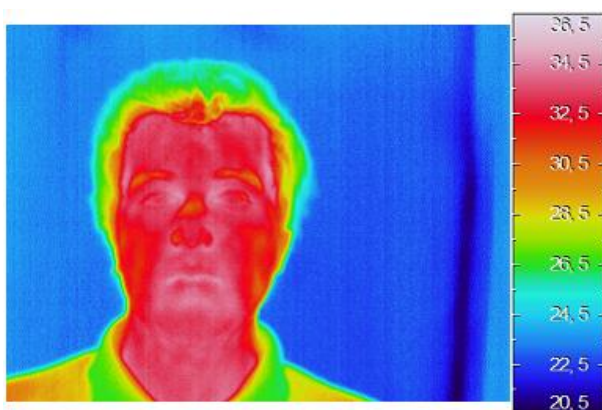
20°C - Fluke



22°C - NEC



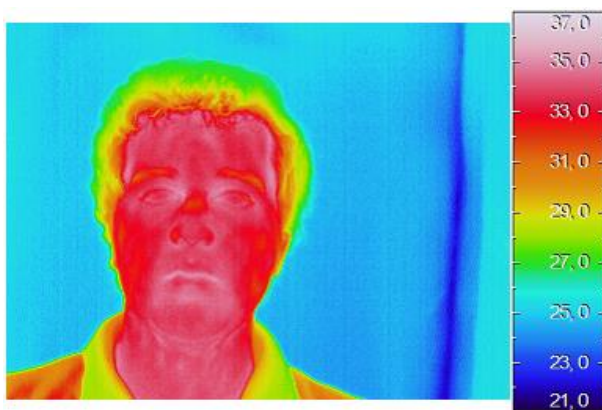
22°C - Fluke



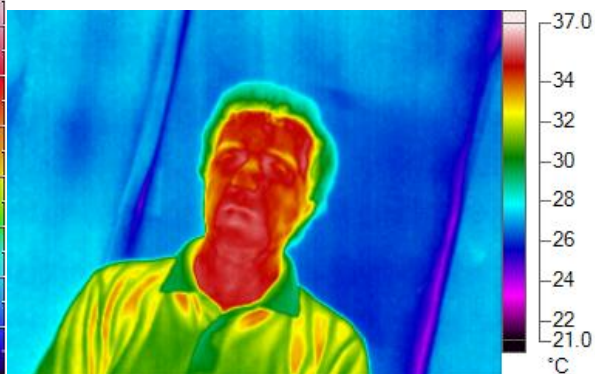
24°C - NEC



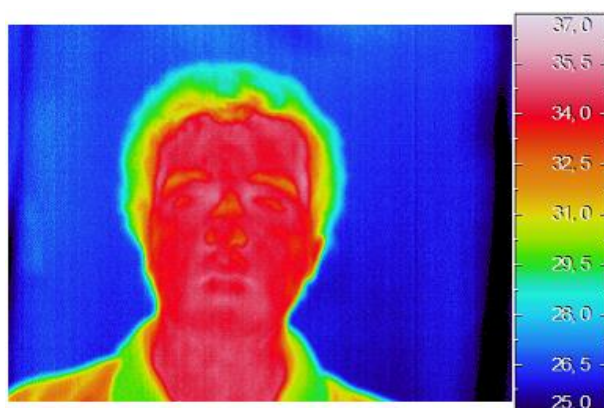
24°C - Fluke



26°C - NEC



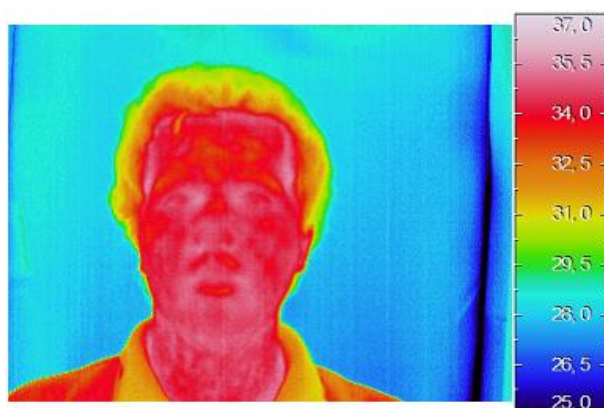
26°C - Fluke



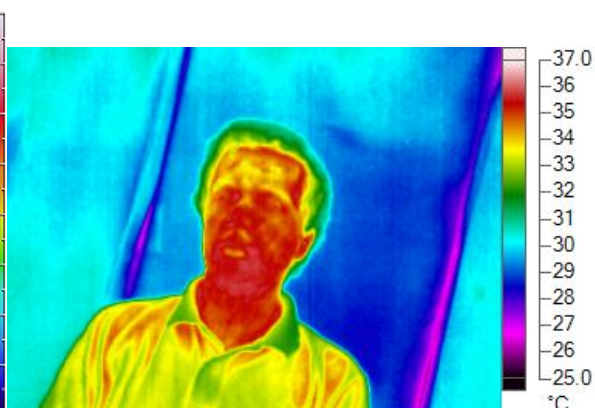
28°C - NEC



28°C - Fluke

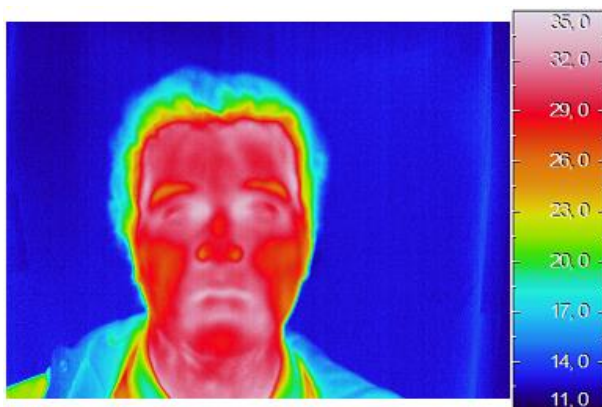


30°C - NEC



30°C - Fluke

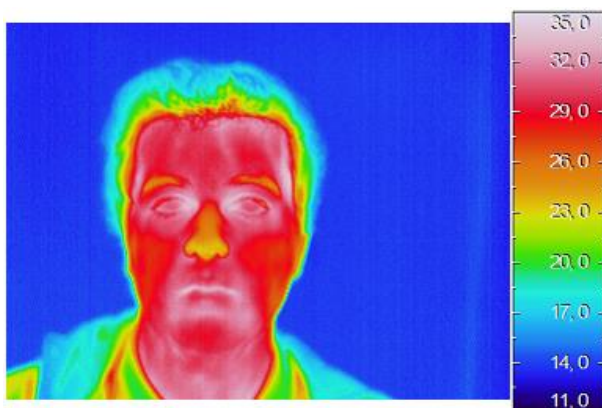
HUMIDADE RELATIVA 75 %



10°C - NEC



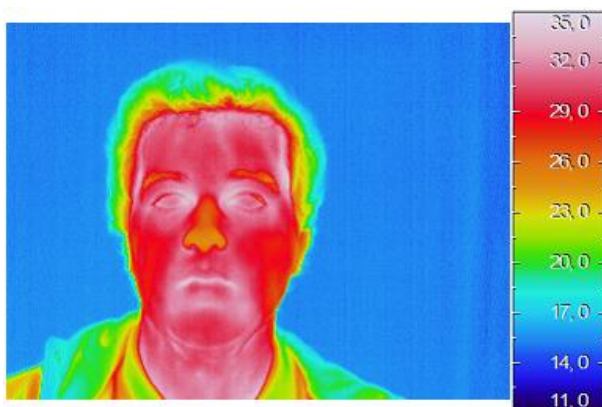
10°C - Fluke



12°C - NEC



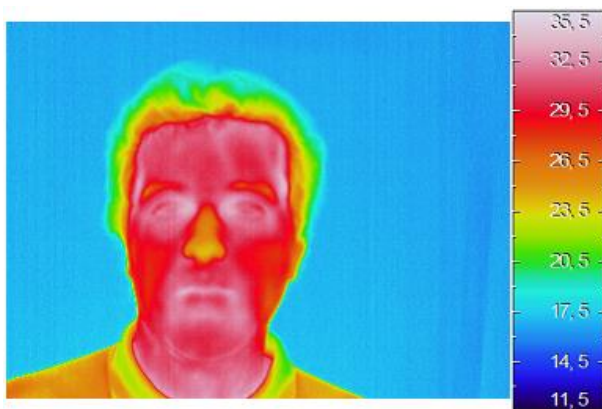
12°C - Fluke



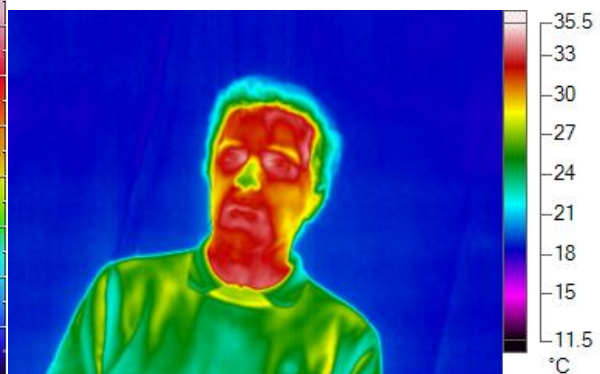
14°C - NEC



14°C - Fluke



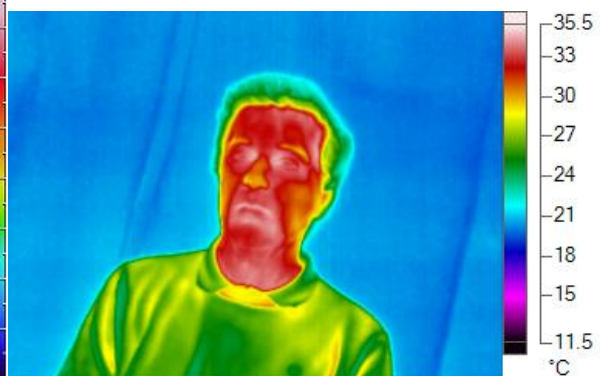
16°C - NEC



16°C - Fluke



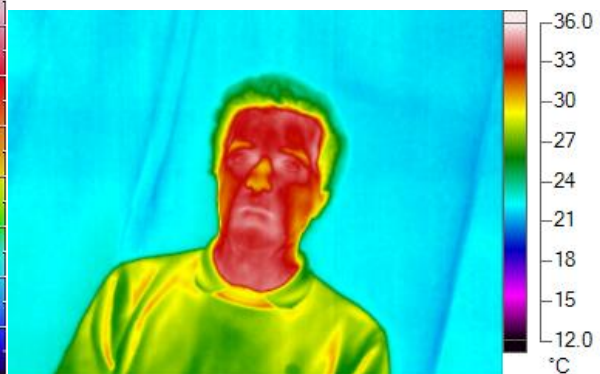
18°C - NEC



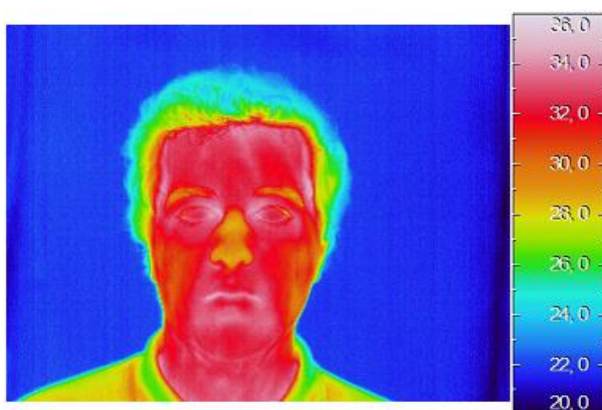
18°C - Fluke



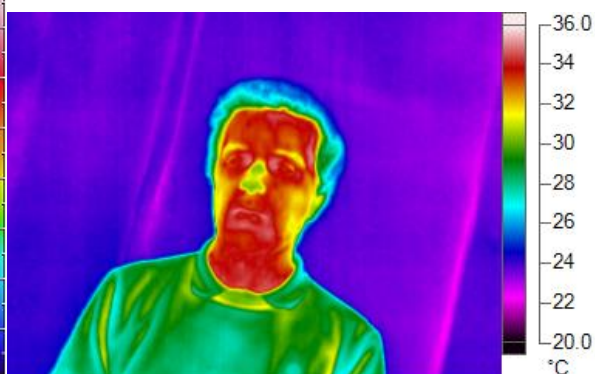
20°C - NEC



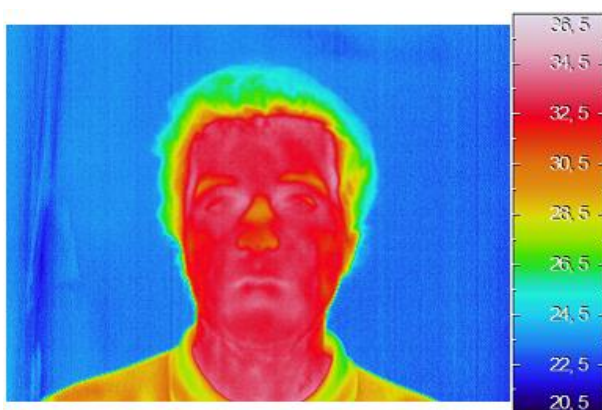
20°C - Fluke



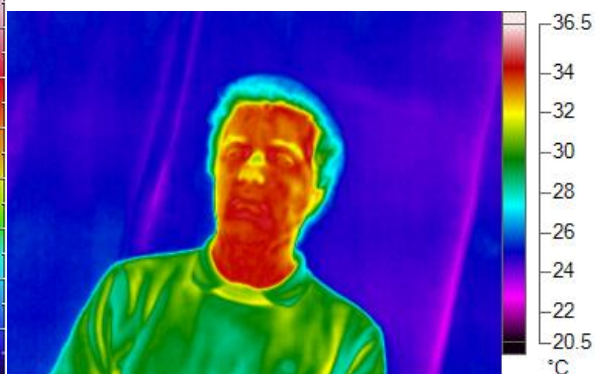
22°C - NEC



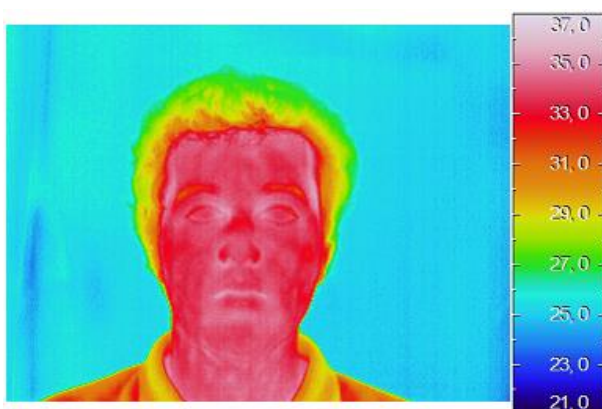
22°C - Fluke



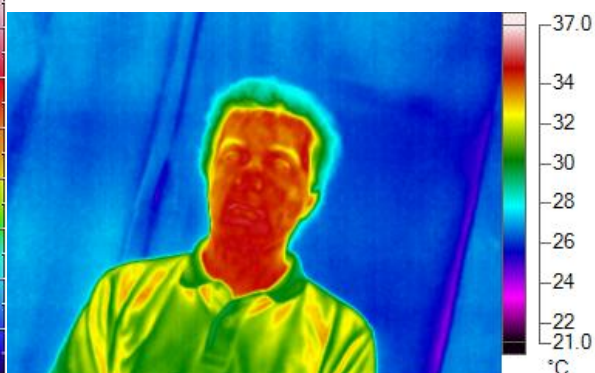
24°C - NEC



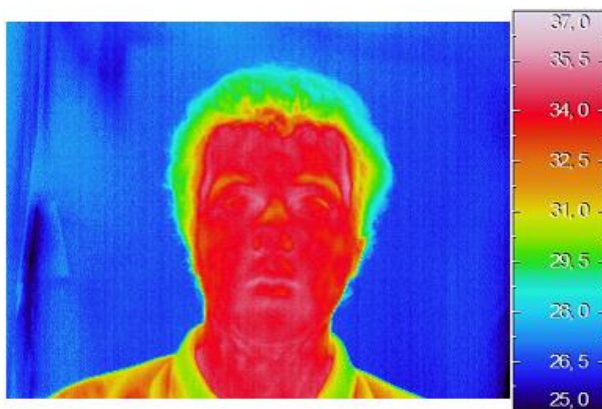
24°C - Fluke



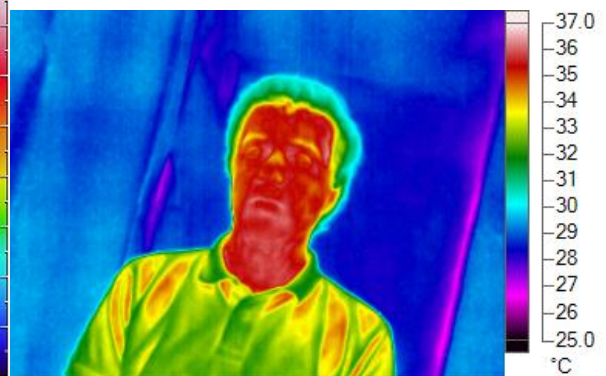
26°C - NEC



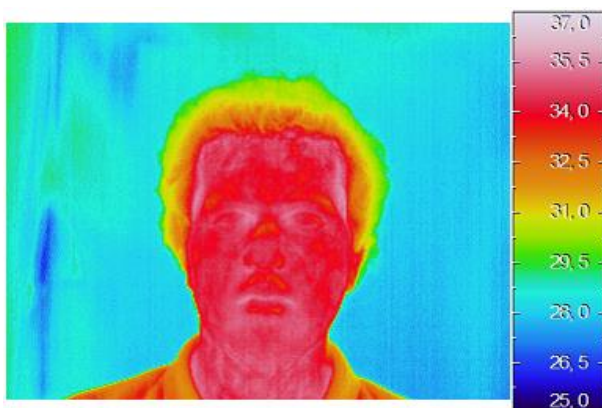
26°C - Fluke



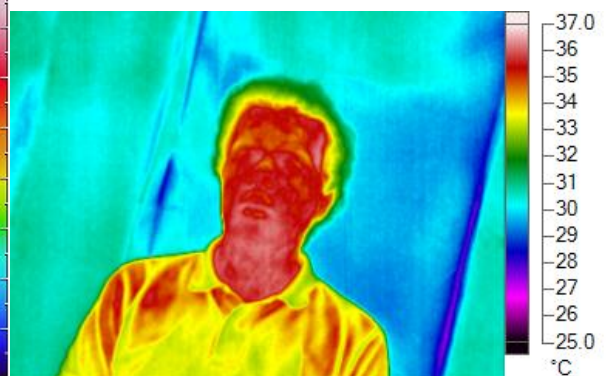
28°C - NEC



28°C - Fluke

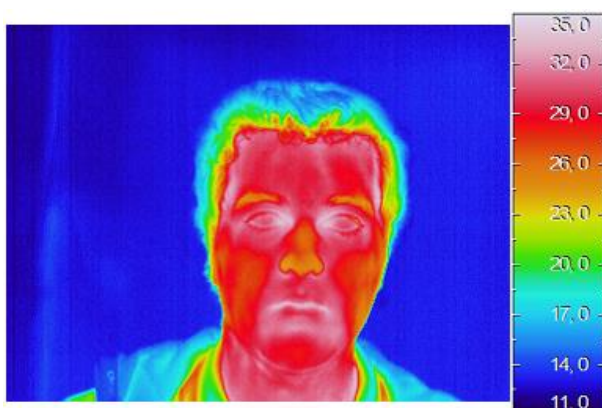


30°C - NEC

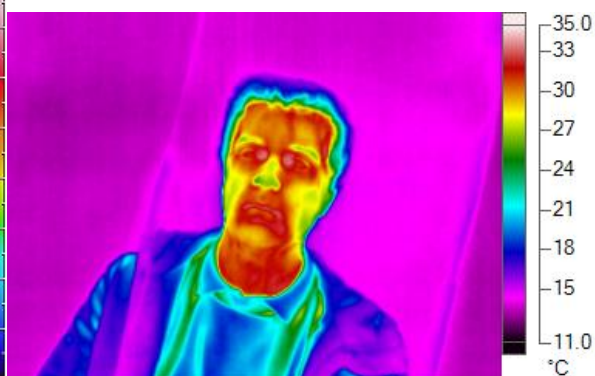


30°C - Fluke

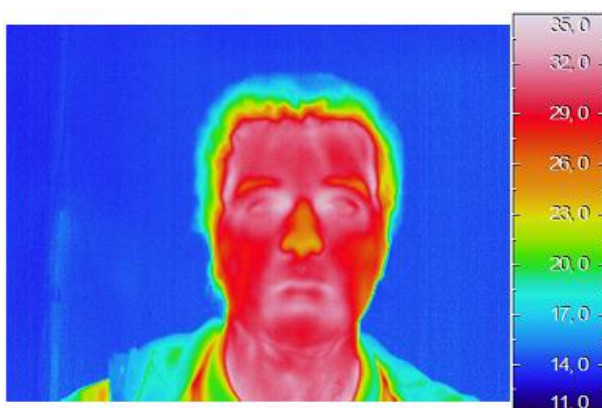
HUMIDADE RELATIVA 80 %



10°C - NEC



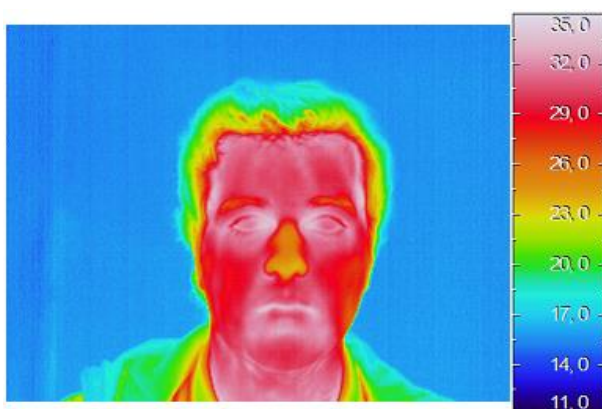
10°C - Fluke



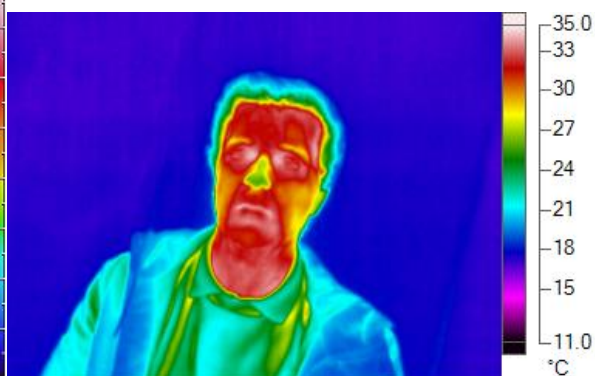
12°C - NEC



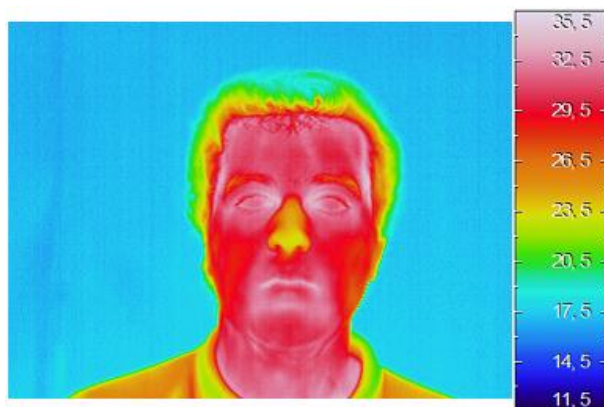
12°C - Fluke



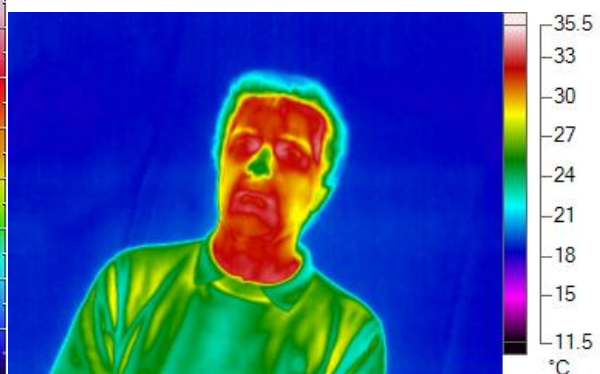
14°C - NEC



14°C - Fluke



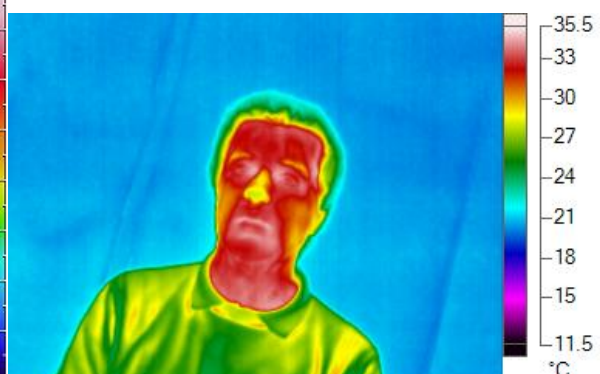
16°C - NEC



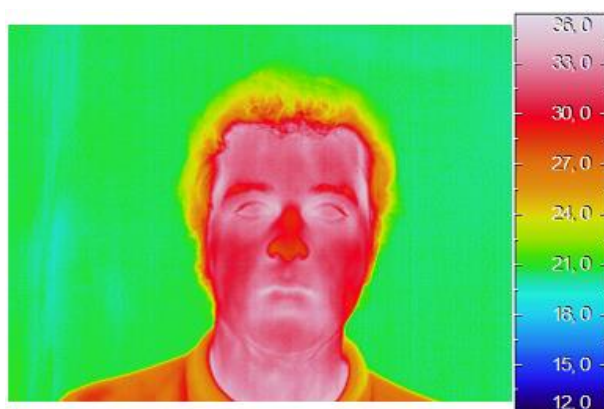
16°C - Fluke



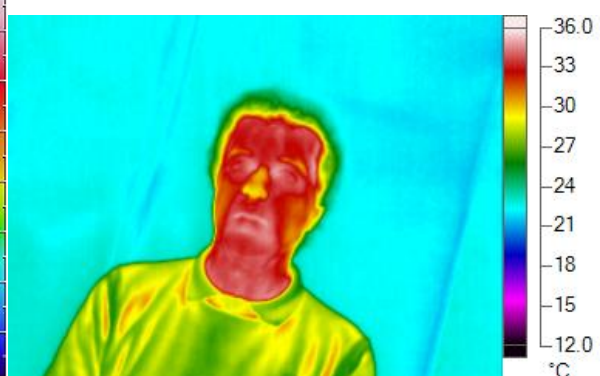
18°C - NEC



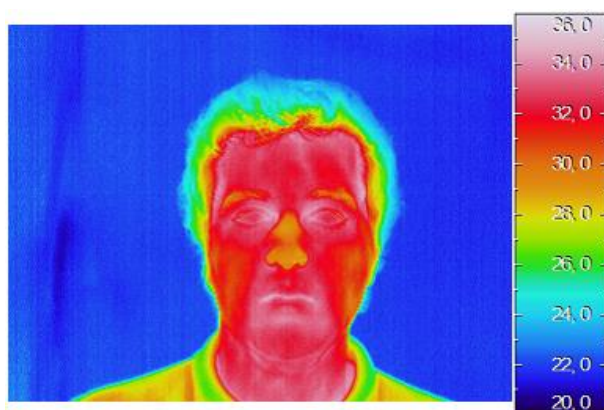
18°C - Fluke



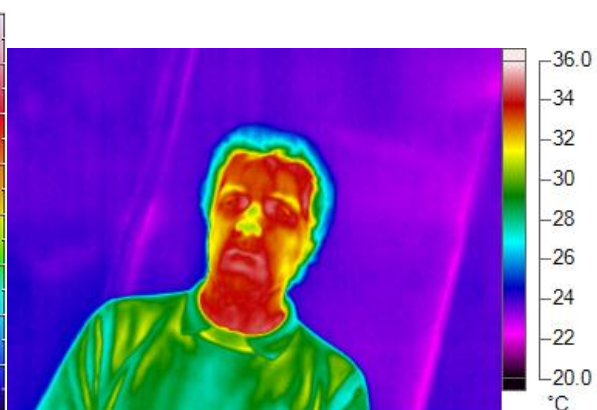
20°C - NEC



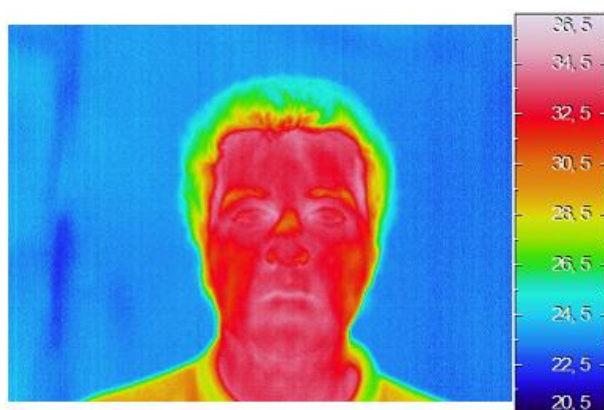
20°C - Fluke



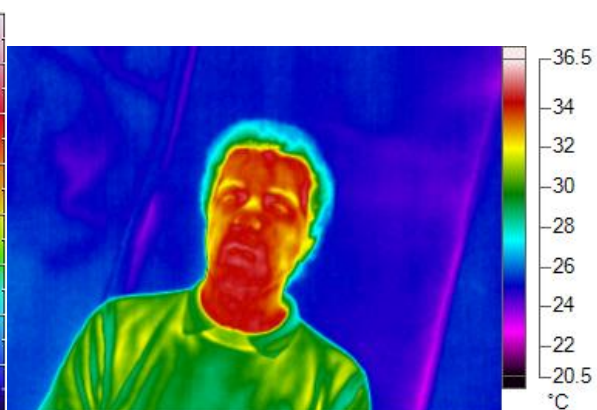
22°C - NEC



22°C - Fluke



24°C - NEC



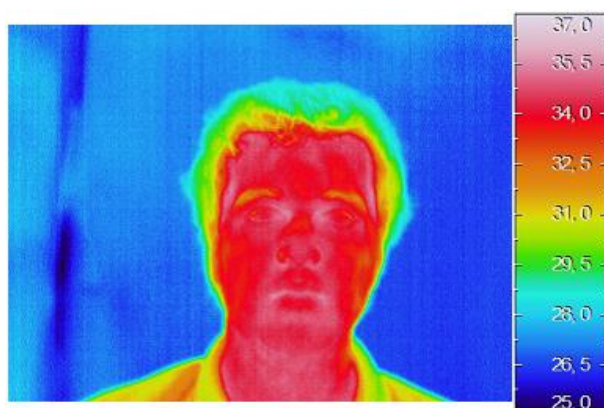
24°C - Fluke



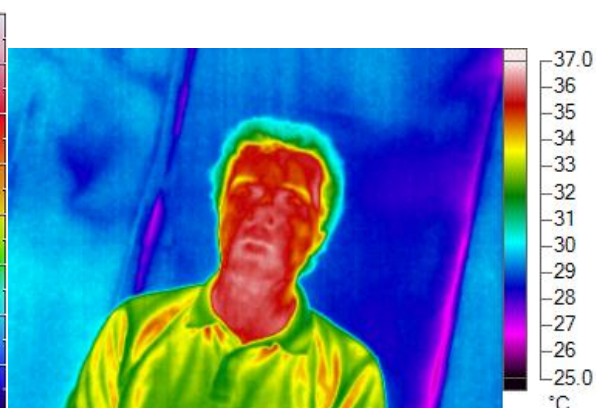
26°C - NEC



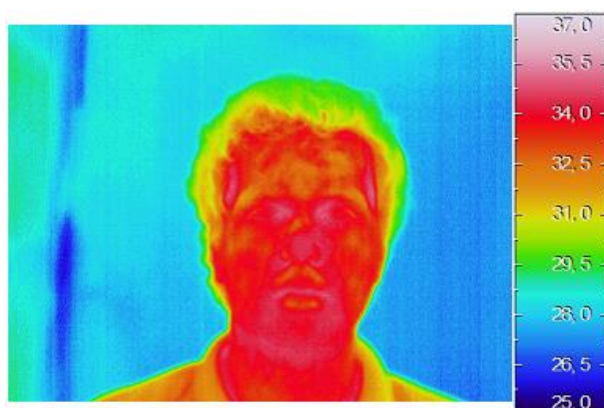
26°C - Fluke



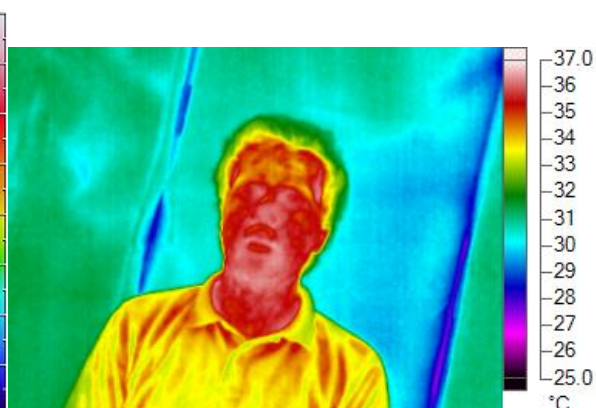
28°C - NEC



28°C - Fluke



30°C - NEC



30°C - Fluke